

# INŽENJERSTVO I MENADŽMENT

Industrijsko inženjerstvo  
Inženjerstvo za energetiku  
Industrijski menadžment

Journal of

# ENGINEERING AND MANAGEMENT

Industrial engineering  
Energy engineering  
Industrial management



ISSN 2831-1426

## Journal of Engineering and Management

---

# Journal of Engineering and Management

JEM is sponsored by:



Government of the  
Republic of Srpska



Mixed Holding Power  
Utility of Republic of  
Srpska



City of Trebinje



Trebisnjica HPP

Vol 1 No 1 (2023)

# Journal of Engineering and Management

---

Volume 1 Number 1

ISSN 2831-1426

e-ISSN 2831-1434

Journal homepage: <https://jem.fpm.ues.rs.ba/>

Circulation: 50 copies

Journal is published semi-annually

Publisher: University of East Sarajevo

Faculty of Production and Management Trebinje

## EDITORIAL BOARD

### Editor-in-Chief

Obrad Spaić,  
University of East Sarajevo, Republic of  
Srpska  
[journal@fpm.ues.rs.ba](mailto:journal@fpm.ues.rs.ba)

### Technical Editor

Marina Milićević,  
University of East Sarajevo, Republic of  
Srpska  
[marina.milicevic@fpm.ues.rs.ba](mailto:marina.milicevic@fpm.ues.rs.ba)

### Desk Editor

Budimirka Marinović,  
University of East Sarajevo, Republic of  
Srpska  
[budimirka.marinovic@fpm.ues.rs.ba](mailto:budimirka.marinovic@fpm.ues.rs.ba)

### Editorial board

**Boris Dumnić**, University of Novi Sad  
**Bojan Lalić**, University of Novi Sad  
**Radivoje Mitrović**, University of Belgrade  
**Bojan Ačko**, University of Maribor  
**Nikola Zivlak**, East China Normal University  
**Gengzhong Feng**, Xi'an Jiaotong University  
**Dušan Jokanović**, University of East Sarajevo  
**Ming Dong**, Antai School of Business, SJTU  
**Branka Gvozdencac Urošević**, University of Novi Sad  
**Uroš Karadžić**, University of Montenegro  
**Jin Chen**, Tsinghua University  
**Iztok Palčič**, University of Maribor  
**Danijela Gračanin**, University of Novi Sad  
**Mirjana Miljanović**, University of East Sarajevo  
**Radoslav Vučurević**, University of East Sarajevo



## Journal of Engineering and Management

Volume 1 / No 1 / June 2023

### CONTENTS

Računarstvo u oblaku za računarnom podržano konstruisanje S. Lemeš	1-5
Određivanje kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika 1.4462 primjenom mehanike loma D. Bajić, M. Marić, T. Vuherer	6-10
Zavarivanje trenjem sa miješanjem - razvoj i primjena N. Šibalić, M. Vukčević, M. Mumović	11-19
Poboljšanje procesa montaže primjenom Lean alata G. Guzina, R. Gojković, S. Moljević, M. J. Đajić	20-26
Potrošnja električne energije kod obrade struganjem O. Spaić, A. Koprivica, B. Marinović, Lj. Kovačević	27-31
Uticaj parametara sinteze polaznog praha 50.0 wt% fe, 47.0 wt% batio3, 33.0 wt% tio2 na magnetna svojstva sinterovanih uzoraka Z. Vuković, O. Kosić, M. Luković, A. Maričić	32-38
Pokazatelji dejstva kavitacije na kaplan turbinama G. Orašanić, S. Simić, S. Šijaković, J. Blagojević	39-44
Primjena aditivne proizvodnje u tržišnoj komunikaciji M. Miljanović, M. Milićević, A. Koprivica, S. Dostinić	45-49

Journal homepage: <https://jem.fpm.ues.rs.ba/>

ISSN: 2831-1426 (print)

ISSN: 2831-1435 (online),

Published by the University of East Sarajevo, Faculty of production and management Trebinje, Trebinje, BiH

# Aims and scope

## Aims

**Journal of Engineering and Management** aims at providing insight into state-of-the-art research in the fields of engineering (industrial engineering, power engineering) and industrial management; it reports on the advancements in engineering sciences and challenges in engineering development; it encourages engineering innovations thus contributing to the well-being and development of society.

The Journal is committed to covering a wide spectrum of subfields in engineering science. Still, its main interest lies in publishing articles on the research in technics including mechanical engineering, industrial engineering, power engineering and industrial management.

## Scope

The topics covered by journal are including the following research areas:

- Machine Materials;
- Production Technologies;
- Production Systems;
- Maintenance of the Production Systems;
- Product Development;
- Measurement and Quality;
- Information Systems in Engineering;
- Fossil Energy;
- Renewable Energy Sources;
- Environmental Issues;
- Energy Systems;
- Energy System Planning and Policies;
- Energy Sustainability;
- Energy Management and Energy Efficiency;
- Unconventional Energy Sources;
- Organization and Human Resource Management;
- Industrial Management.



## Cloud Computing for Computer Aided Design

### Računarstvo u oblaku za računarom podržano konstruisanje

Samir Lemeš\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet, Fakultetska 1, 72000 Zenica, Bosna i Hercegovina

**Abstract:** *Cloud computing is a growing segment of information technology and finds new areas of application every day. One of the areas that has long resisted this technology is CAD (Computer-Aided Design), as it implies the need to transfer a large amount of graphic data. In the last few years, all leading manufacturers of CAD software have offered solutions based on cloud computing in their product range. It started with the concept of IaaS (Infrastructure as a service) by enabling access to common repositories for CAD files in the cloud, followed by moving to the concept of PaaS (Platform as a service) through collaborative work and connection with PDM/PLM systems. The modern concept includes SaaS (Software as a service), i.e. launching applications, processing and storing data through an internet browser or through a dedicated mobile application. This paper provides an overview of the current SaaS solutions of the leading CAD software manufacturers.*

**Keywords:** *Cloud Computing, SaaS, Computer Aided Design, CAD*

**Apstrakt:** *Računarstvo u oblaku je rastući segment informacionih tehnologija i svakodnevno nalazi nova područja primjene. Jedno od područja koje se dugo opiralo ovoj tehnologiji je CAD (računarom podržano konstruisanje), jer je podrazumijevalo potrebu za prenosom veće količine grafičkih podataka. Posljednjih nekoliko godina svi vodeći proizvođači CAD softvera u paletu proizvoda uvrstili su i rješenja zasnovana na računarstvu u oblaku. Počelo se s konceptom IaaS (infrastruktura kao usluga) omogućavanjem pristupa zajedničkim repozitorijima za CAD datoteke u oblaku, nakon čega se prešlo na PaaS koncept (platforma kao usluga) kroz kolaborativni rad i vezu sa PDM/PLM sistemima. Moderni koncept podrazumijeva SaaS (softver kao usluga), odnosno pokretanje aplikacija, obrada i pohranjivanje podataka kroz internet browser ili kroz namjensku mobilnu aplikaciju. U ovom radu dat je osvrt na aktuelna SaaS rješenja vodećih proizvođača CAD softvera.*

**Ključne riječi:** *Računarstvo u oblaku, SaaS, Računarom podržano konstruisanje, CAD*

## 1 UVOD

Pojam "računarstvo u oblaku" (*Cloud Computing*) predstavlja relativno novu paradigmu informacionih tehnologija, koja podrazumijeva distribuiranu infrastrukturu, ne samo za smještaj podataka, nego i za pokretanje aplikacija. Termin "oblak" nastao je još u ranim počecima *World Wide Web*-a, ali je prva primjena ovog koncepta počela 2002. godine, kada je kompanija Amazon formirala svoju podružnicu *Amazon Web Services*. Trebalo im je oko četiri godine da ponude prve usluge virtualizacije serverskih resursa u vidu *Simple*

\* [slemes@unze.ba](mailto:slemes@unze.ba)

*Storage Service (S3)*, i *Elastic Compute Cloud (EC2)*, nakon čega su i druge velike IT kompanije ponudile svoja rješenja (*Google App Engine 2008*, *Microsoft Azure 2010*, *IBM SmartCloud 2011*). Danas je to jedno od najjačih tržišta u IT, koje se procjenjuje na skoro 370 milijardi dolara i godišnjom stopom rasta od 15,7% [1].

Paradigma stepena centralizacije računarskih resursa za CAD se mijenjala kroz vrijeme [2]. Od centralizirane konfiguracije do kraja 1970-ih prešlo se na distribuiranu konfiguraciju. Tokom 1980-ih dominirali su jaki klijenti (radne stanice) i nešto slabiji serveri. Tokom 1990-ih, s

rastom brzine i propusnosti računarskih mreža prešlo se na jače servere i slabije klijente, a od 2010-ih se prelazi na računarstvo u oblaku i virtualizaciju.

Proizvođači CAD softvera su relativno kasno počeli koristiti prednosti računarstva u oblaku, iz prostog razloga što takve aplikacije imaju znatno veće zahtjeve u pogledu propusnosti mrežne infrastrukture, jer CAD podrazumijeva prenos velikih količina grafičkih podataka. Najveći udio u tržištu prema [3] trenutno imaju PTC Onshape, Dassault Systemes Solidworks xDesign, Autodesk Fusion360 i Siemens Solid Edge.

Gaha i dr. u [4], kao i Junk i Spannbauer u [5] upoređivali su osobine i kapacitet dva izabrana CAD rješenja u oblaku - Fusion 360 i Onshape sa aspekta njihove upotrebljivosti u edukaciji mašinskih inženjera. Zaključili su da su ta dva softvera sličnih karakteristika, ali su dali blagu prednost Fusion 360 jer je lakši za korištenje i ima više mogućnosti, dok je Onshape intuitivniji i stoga lakši za savladavanje novim korisnicima.

I Barrie je u [6] ocjenjivao CAD u oblaku sa aspekta obuke i obrazovanja. Posebno je istakao važnost integracije CAD alata u PDM/PLM sisteme. Poredio je Onshape sa Fusion 360 i GrabCAD i zaključio da je za potrebe obuke novih korisnika ili upotrebe u nastavi na mašinskim fakultetima Onshape najpovoljnije rješenje, te da ova tehnologija još uvijek nije dovoljno napredna da bi zamijenila tradicionalne CAD alate koji se instaliraju i pokreću lokalno.

Lemeš se u [7] osvrnuo na mogućnosti razmjene podataka između heterogenih CAD sistema koje pruža CAD u oblaku, kroz primjer aplikacije Autodesk A360. Ta aplikacija vremenom je evaluirala u web komponentu AutoCAD-a.

Gigante je u [3] pokušao objasniti razloge za sporo usvajanje CAD rješenja u oblaku, te je kao najčešći razlog identifikovao rizik od narušavanja sigurnosti podataka. Uprkos tome, on predviđa rast CAD rješenja u oblaku od 20% tokom narednih tri do pet godina.

## 2 RAČUNARSTVO U OBLAKU

Računarstvo u oblaku je koncept koji opisuje računarsku infrastrukturu kao što su resursi za pohranjivanje podataka ili aplikacijski softver, a koja je realizovana kao usluga putem Interneta [8]. Obično se realizuje kao jedan od tri koncepta: IaaS, PaaS i SaaS (slika 1).

Klasični model	IaaS	PaaS	SaaS
Aplikacija	Aplikacija	Aplikacija	Aplikacija
Podaci	Podaci	Podaci	Podaci
Interfejs	Interfejs	Interfejs	Interfejs
Operativni sistem	Operativni sistem	Operativni sistem	Operativni sistem
Virtualizacija	Virtualizacija	Virtualizacija	Virtualizacija
Serveri	Serveri	Serveri	Serveri
Pohranjivanje	Pohranjivanje	Pohranjivanje	Pohranjivanje
Mreža	Mreža	Mreža	Mreža

Slika 1 – Osnovni koncepti računarstva u oblaku (bijelim komponentama upravlja korisnik a sivim komponentama upravlja pružatelj usluga u oblaku)

Infrastruktura kao usluga (Infrastructure as a Service - IaaS) korisniku pruža mogućnost upravljanja aplikacijom za obradu podataka i operativnim sistemom, a u oblaku se na virtualnim serverima samo pohranjuju podaci. Korisnik nema nadzor nad infrastrukturom oblaka.

Platforma kao usluga (Platform as a Service - PaaS) korisniku kao uslugu omogućava razvojno okruženje. Korisnik može sam definirati i izraditi vlastite aplikacije koje se pokreću na infrastrukturi pružaoca usluge. Korisnik ne može provjeravati mrežne resurse, strukturu oblaka, sisteme pohranjivanja, operativne sisteme, ali ima nadzor nad razvijenim aplikacijama.

Softver kao usluga (Software as a service - SaaS) je model distribucije softvera u kojem se i aplikacije i podaci pohranjuju u računarskom oblaku, a korisnik im pristupa kroz browser.

Svi navedeni koncepti računarstva u oblaku imaju zajedničke elemente, a to je da se krajnji korisnik oslobađa dijela obaveza održavanja IT infrastrukture, u stepenu koji mu odgovara. U zavisnosti od stepena virtualizacije, korisnik na pružaoca usluga u oblaku prebacuje odgovornost za instaliranje, održavanje i nadgradnju hardvera, mrežne opreme, servera, operativnog sistema, izrade rezervnih kopija podataka, antivirusnu zaštitu, povećanje kapaciteta za

pohranjivanje podataka, za šta korisnik plaća određenu naknadu.

Napredni SaaS sistemi nude praktično neograničene pakete usluga, koji se jednostavno proširuju u skladu s potrebama korisnika. Umjesto da korisnik brine o tome ima li dovoljno RAM memorije, procesorske snage, prostora za pohranjivanje na disku, grafički procesor ili broj licenci, sve te resurse ili dio njih iznajmljuje iz oblaka. To povećava skalabilnost i pouzdanost sistema, optimizira troškove i olakšava timski rad. Jedino što korisnik mora obezbijediti je stabilna i dovoljno brza internet konekcija.

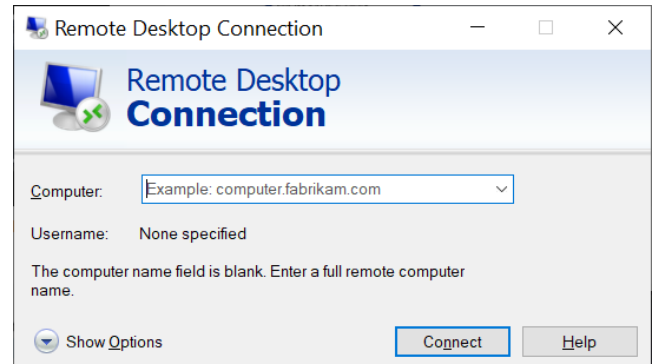
### 3 PRIMJERI CAD ALATA U OBLAKU

CAD softver postepeno evaluira od IaaS preko PaaS do SaaS koncepta. Prva IaaS rješenja su podrazumijevala samo mogućnost razmjene CAD podataka putem specijaliziranih baza podataka (PLM/PDM). Ta funkcionalnost se mogla postići i jednostavnim korištenjem univerzalnih generičkih IaaS sistema, kao što su Google Drive ili Microsoft OneDrive, ali integrisana rješenja nude veću sigurnost jer se radi o zatvorenim namjenskim sistemima, uz dodatnu funkcionalnost upravljanja verzijama, korisničkim pravima i upravljanja timovima projekatanata.

PaaS podrazumijeva da korisnik mora imati lokalno instaliran klijentski softver i da se podaci pohranjuju i lokalno i na infrastrukturi u oblaku. Obično se u PaaS konceptu radi o kombinaciji lokalnog CAD softvera i rješenja za podršku koja nisu CAD, a koriste infrastrukturu oblaka.

Na slici 2 prikazan je alat za udaljeni pristup integrisan u Microsoft Windows operativni sistem. Jedan potencijalni scenario upotrebe ovog sistema je licenca za CAD softver instalirana na računaru u projektnom birou, kojoj se može pristupiti s bilo koje udaljene lokacije na kojoj postoji internet veza. Potencijalni problem može predstavljati razlika u rezoluciji ekrana klijenta i računara s licencom za CAD softver kojem se pristupa s udaljene lokacije. Ovaj koncept nije vezan samo za CAD nego se koristi i za bilo koju drugu svrhu, a osim Microsoft rješenja mogu se

koristiti i specijalizirani alati kao što je TeamViewer ili funkcionalnost Chrome browsera Google Chrome Remote Desktop ([remotedesktop.google.com](https://remotedesktop.google.com)).



Slika 2 – Pokretanje CAD softvera na udaljenom računaru može se smatrati PaaS konceptom

Pravi SaaS koncept podrazumijeva da klijent ne mora imati instaliran poseban klijentski softver nego se svim resursima pristupa kroz internet browser.

U nastavku su prikazana tri CAD proizvođača koje proizvođači softvera nude kao SaaS rješenja u oblaku.

#### 3.1 PTC Onshape

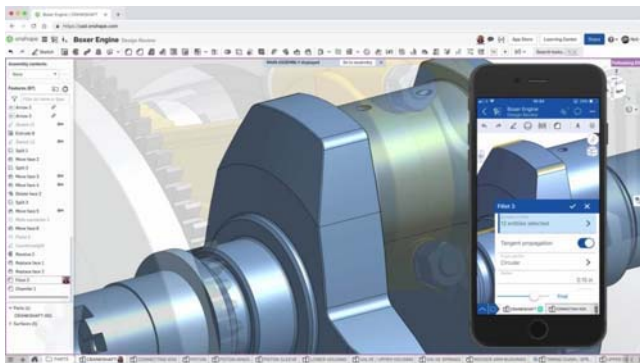
Najpoznatiji CAD proizvod kompanije PTC je softver Pro/ENGINEER. 2019. godine izvršili su akviziciju kompanije Onshape, koja je 2015. godine razvila vlastiti CAD softver u oblaku kojem se pristupa kroz browser ili kroz aplikacije za iPhone i Android mobilne uređaje. Pored CAD modeliranja, ova aplikacija ima i module za CAE simulacije, CAM i rendering.

Glavna karakteristika ovog softvera je mogućnost simultanog rada više korisnika na istom CAD modelu preko računarskog oblaka, uz praćenje verzija i izmjena modela. Primarno je namijenjen za primjenu u mašinstvu, odnosno u dizajnu proizvoda za potrošačku elektroniku, mašine, medicinske uređaje, industrijsku opremu, kao i za 3D štampanje i CAM obradu. U sebi ima integrisan sistem za PDM (Product Data Management) i mogućnost pristupa PTC Arena PLM (Product Lifecycle Management) sistemu.

Nudi se mogućnost pribavljanja besplatnih licenci za nekomercijalne namjene, te za studente i nastavnike, koja ima punu funkcionalnost kao i komercijalna



verzija, osim renderinga 3D modela i praćenja verzija CAD modela.



Slika 3 – PTC Onshape  
(<https://www.ptc.com/en/products/onshape>)

### 3.2 Solidworks xDesign

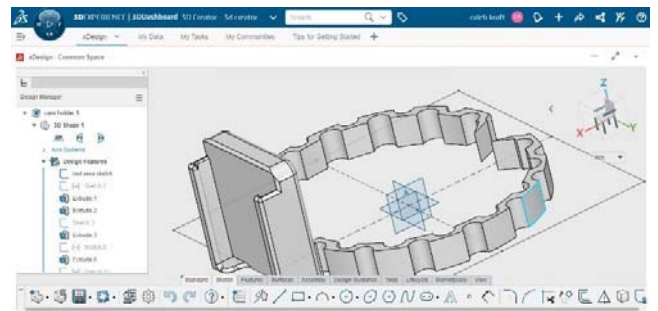
Kompanija Dassault Systèmes, odnosno njen dio SolidWorks Corporation, u ponudi imaju SaaS softver SolidWorks xDesign. Njihova platforma 3DEXPERIENCE sastoji se od više aplikacija zasnovanih na oblaku u međusobno povezanom okruženju. Aplikacija xDesign nudi parametarsko CAD modeliranje zasnovano na karakteristikama kojoj se pristupa direktno kroz browser. Alati su intuitivni za korisnike koji imaju iskustva u SolidWorks-u.

Ova platforma sadrži i druge SaaS aplikacije koje se zajedno sa xDesign nazivaju xApps [9]. Sve dijele poznato radno okruženje, a uključuju:

- xShape: Modeliranje površinskih CAD modela
- xMold: Alati za kalupe za livenje i brizganje
- xFrame: Zavareni elementi konstrukcije
- xSheetMetal: dijelovi od lima

Nedostatak ovog proizvoda u odnosu na desktop verziju je nemogućnost korištenja CAE simulacija, te potpuna ovisnost o mrežnoj konekciji. Iskustvo korisnika pokazuje da ovaj proizvod zahtijeva kvalitetnu internet vezu za stabilan rad bez prekida.

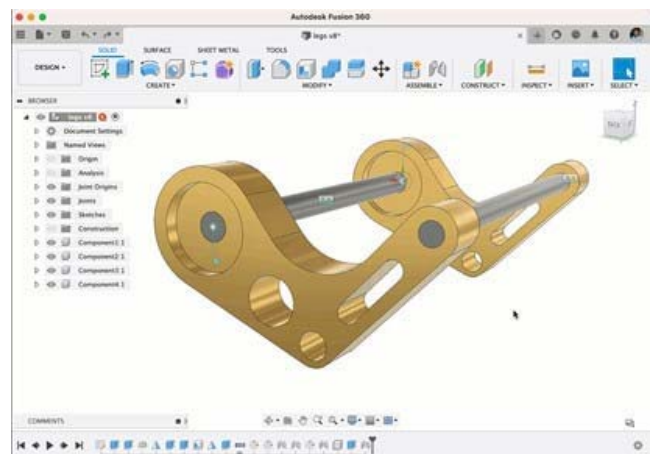
Ne postoji besplatna verzija softvera, ali se nudi povoljna cijena mjesečne ili godišnje licence za male proizvođače iz određenih zemalja koji svoje proizvode modeliraju u CAD-u, a čija komercijalna vrijednost ne prelazi 2.000 dolara godišnje [11].



Slika 4 – Solidworks xDesign [11]

### 3.3 Autodesk Fusion 360

Kompanija Autodesk u svojoj paleti proizvoda nudi nekoliko SaaS rješenja. Pored web-bazirane verzije AutoCAD-a (<https://web.autocad.com>) koja je sastavni dio licence za AutoCAD, postoji i poseban SaaS softver Fusion 360 za mašinski dizajn proizvoda, kao i BIM 360 za modeliranje građevinskih objekata, besplatna aplikacija Tinkercad za dizajniranje i edukaciju, te integrisano rješenje Autodesk cloud services.



Slika 5 – Autodesk Fusion 360 [11]

Fusion 360 je komercijalni softver za CAD, CAM i CAE simulacije, nastao na bazi desktop aplikacije Inventor. Dostupan je za Windows i macOS, uz pojednostavljene aplikacije dostupne za Android i iOS. Koristi se kroz plaćanje pretplate, a dostupna je i besplatna ograničena nekomercijalna osobna verzija [11].

## 4 DISKUSIJA

Poređenje SaaS baziranih CAD rješenja pokazuje da proizvođači softvera imaju značajno različite pristupe licenciranja i povezivanja sa desktop aplikacijama koje

se instaliraju lokalno i koje mogu raditi i bez pristupa internetu. Neki proizvođači nude besplatne licence, dok su neke dostupne isključivo na komercijalnoj osnovi. Neke su dostupne samo kroz internet browser, dok neke imaju i posebne aplikacije za mobilne uređaje. Neke pružaju mogućnost drugih CAx funkcionalnosti kao što su proračuni, simulacije, izrada koda za CAM, modeliranje površinskih modela i limova i sl. dok druge te funkcionalnosti imaju samo u desktop verzijama.

Među brojnim prednostima SaaS koncepta je eliminisanje potrebe za prevođenjem formata datoteka, posebno starijih verzija, jer se u oblaku uvijek nalazi i koristi posljednja verzija softvera. Tako su eliminisane potrebe za nadogradnjom verzija softvera.

Svima je s druge strane karakteristično da će postepeno konvergirati ka SaaS rješenjima, koja su u potpunosti eliminisala mogućnost piratiziranja softvera i korištenja bez plaćanja licenci. Ograničenja vezana za dostupnost i brzine pristupa internetu polako nestaju i za očekivati je da je perspektiva budućeg razvoja CAD aplikacija upravo u računarskom oblaku.

## 5 ZAKLJUČAK

Računarstvo u oblaku je neizbježan pravac razvoja CAD softvera. Osnovni motor razvoja i tranzicije na SaaS je model licenciranja vezan za korisnike. Može se očekivati da će SaaS rješenja u dogledno vrijeme u potpunosti istisnuti desktop CAD softver.

## 6 LITERATURA

- [1] Grand View Research (2022) *Cloud Computing Market Size Report 2022-2030*. ID: GVR-4-68038-210-5. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cloud-computing-industry>
- [2] Wu D., Rosen D.W., Wang L. and Schaefer D. (2015) Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-aided design*, 59, pp 1-14, doi: 10.1016/j.cad.2014.07.006
- [3] Gigante M. (2020) SaaS-Based CAD is Taking Over, <https://www.g2.com/articles/saas-based-cad-is-taking-over>
- [4] Gaha R., Nicolet P.-M., Bricogne M., Eynard B. (2021) Teaching Experiments for Engineering Education Based on Cloud CAD Software, in *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Gothenburg, Sweden, 16-20 August 2021. doi: 10.1017/pds.2021.556
- [5] Junk S. and Spannbauer D. (2018) Use of Cloud-Based Computer Aided Design Software in Design Education, *17th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITHET.2018.8424769.
- [6] Barrie J. (2016) Applications for cloud-based CAD in design education and collaboration. In *DS 83: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE16)*, Design Education: Collaboration and Cross-Disciplinarity, Aalborg, Denmark, pp 178-183.
- [7] Lemeš S. (2017) Računarstvo u oblaku kao alat za razmjenu CAD podataka. In: *Proceedings of the 10th International conference "Quality 2017" (Brdarević S., Jašarević S. eds.)*, pp 39–46, Neum, Bosnia and Herzegovina. ISSN 1512-9268
- [8] Chai W, Casey K (2020) Software as a Service (SaaS), <https://www.techtarget.com/searchcloudcomputing/definition/Software-as-a-Service>
- [9] Williamson B (2019) SOLIDWORKS xDesign: An Elegant Way to Work. <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2019/03/solidworks-xdesign-an-elegant-way-to-work.html>
- [10] Kraft C (2021) Check Out The New 3DEXPERIENCE SOLIDWORKS for Makers. <https://makezine.com/article/maker-news/check-out-the-new-3dexperience-solidworks-for-makers/>
- [11] Fusion 360 for personal use. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>



## Determination of the Quality of the Welded Joint of Duplex Steel 1.4462 using Fracture Mechanics

### Određivanje kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika 1.4462 primjenom mehanike loma

D. Bajić\*<sup>1</sup>, M. Marić<sup>2</sup>, T. Vuherer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Bul. Džordža Vašingtona bb, Podgorica, Crne Gora

<sup>2</sup> Univerzitet u Mariboru, Fakultet za strojništvo Maribor, Smetanova ul.17, Maribor, Republika Slovenija

**Abstract:** The microstructure of duplex stainless steels at room temperature is austenitic-ferritic in the ratio of 50% austenite and 50% ferrite. These materials have high corrosion resistance. Recognizing this property, duplex steels have found their application in practice for operating temperatures ranging from -50 °C to 350 °C. In the fields of thermomechanics and petrochemicals, these materials are used more and more. The purpose of this work is to define the quality level of the welded joint of duplex steel 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) using fracture mechanics methods. The welding of sheets with a thickness of 10 mm was performed using the conventional MAG (Metal Active Gas) procedure. Test results have confirmed the high level of quality of the welded joint.

**Keywords:** duplex stainless steel, MAG, J-integral fracture mechanics

**Apstrakt:** Mikrostruktura dupleks nerđajućih čelika na sobnoj temperaturi je austenitno – feritna u odnosu 50% austenit i 50% ferit. Ovi materijali posjeduju visoku korozionu otpornost. Uvažavajući ovo svojstvo, dupleks čelici su u praksi našli svoju primjenu za radne temperature u rasponu od -50 °C do 350 °C. U oblastima termotehnike i petrohemijske ovi materijali se sve više koriste. Cilj rada je definisati nivo kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) primjenom metoda mehanike loma. Zavarivanje limova debljine 10 mm izvršeno je primjenom konvencionalnog MAG (Metal Active Gas) postupka. Rezultati ispitivanja su potvrdili visok nivo kvaliteta zavarenog spoja.

**Ključne riječi:** dupleks nerđajući čelik, MAG, mehanika loma J-integral

## 1 UVOD

Dupleks čelici ili austenitno-feritni čelici se odlikuju dvofaznošću. Visokom sadržaju austenita ovim čelicima obezbjeđuje visoku duktilnost i dobru korozionu postojanost na niskim temperaturama. Naponska korozija je glavni uzročnik pojave prslina kod ovih čelika. Uloga feritne faze je da obezbijedi visok nivo njegove čvrstoće i otpornosti pojave prslina.

Hemijski sastav nerđajućih dupleks čelika čine hrom 21-27%, nikl 1,25-5,5% i ugljenik 0,02%, a kada govorimo o drugim legirajućim elementima treba spomenuti bakar 0,5%, mangan 5% i molibden 3% [1]. Osnovna podjela dupleks nerđajućih čelika je na [2]:

- dupleks nerđajuće čelike koji u svom sastavu ne sadrže azot usled čega imaju slabu zavarljivost,
- dupleks nerđajuće čelike koji su u svom sastavu sadržali azot u obimu 0,1-0,25%,
- dupleks nerđajući čelici kod kojih je ekvivalentna otpornosti na piting koroziju  $PREN > 40$  ( $PREN$  - postojanost dupleks nerđajućih čelika na tačkastu (piting) koroziju).

Ekvivalentna otpornost ( $PREN$ ) prema [2] računa se pomoću izraza:

$$PREN = \%Cr + 3,3x(\%Mo) + 30x(\%N) \quad (1)$$

dok se prema [3] i [4] računa pomoću izraza:

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16x\%N \quad (2)$$

\* darko@ucg.ac.me

Dupleks čelici imaju izrazito dobra mehanička svojstva, visoku čvrstoću i dobru duktilnost do  $-40^{\circ}\text{C}$ . Kako temperaturno područje njihove primjene počinje od  $-50^{\circ}\text{C}$ , dok dobru duktilnost zadržavaju do  $-40^{\circ}\text{C}$ , može se izvesti zaključak da je postepen prelaz iz duktilnog u krto stanje.

U zavisnosti od karakteristika osnovnog materijala (OM) dupleks čelika 1.4462, tj. prema njegovom hemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima, izvršen je odabir dodatnog materijala za zavarivanje. Dodatni materijal pri MAG zavarivanju je puna nerđajuća topljiva žičana elektroda G/W 22 9 NL (ISO 14343-A) prečnika  $\varnothing 1\text{mm}$ . Izvršeno je višeprolazno zavarivanje MAG postupkom koristeći aparat VARSTROJ-VARMIG 600 D44 Synergu sa parametrima zavarivanja: napon električnog luka  $U = 23,9\text{ V}$ , jačina struje zavarivanja  $I = 151,2\text{ A}$  i brzina zavarivanja  $v = 35\text{ cm/min}$ . Temperatura međuprolaza je  $+150^{\circ}\text{C}$  [5].

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala zavarenih spojeva, odnosno metala šava (MŠ), debljine 10 mm primjenom MAG postupka pokazalo je slične vrijednosti s vrijednostima mehaničkih svojstava OM. Ispitivanja koja obuhvataju ispitivanje na zatezanje, ispitivanje duktilnosti po Charpy, ispitivanje tvrdoće HV metodom, potvrđuju dobra mehanička svojstva i dobru zavarljivost dupleks čelika 1.4462 [5, 6].

## 2 METODOLOGIJA RADA

### 2.1 Uzorkovanje epruveta

Po završetku zavarivanja (slika 1 i slika 2), tečnim penetrantima (slika 3) izvršeno je ispitivanje kvaliteta zavarenih spojeva s aspekta postojanja površinskih prslina. Ispitivanjem je potvrđeno da ne postoje površinske greške u zavarenim spojevima.



Slika 1 - Lice zavarenog spoja ploča debljine 10 mm

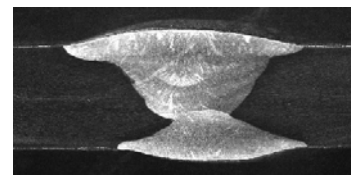


Slika 2 - Korijenska strana ploča debljine 10 mm



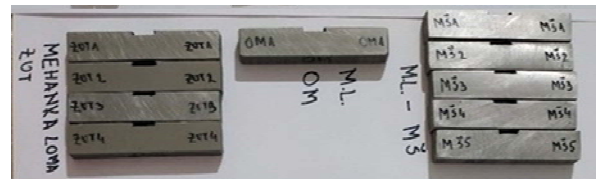
Slika 3 - Penetrantska kontrola zavarenog spoja limova 10 mm

Makro izbrusak na kom se jasno detektuju zavarivački prolazi (zavari) prikazan je na slici 4.



Slika 4 - Makroizbrusak zavarenog spoja

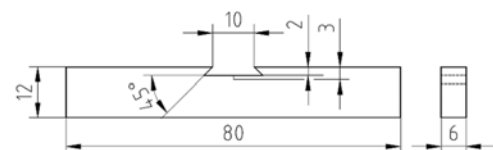
Uzorkovanje epruveta (slika 5) iz zavarenih ploča dimenzija  $360 \times 240 \times 10\text{ mm}$  izvršeno je primjenom WaterJet tehnologije.



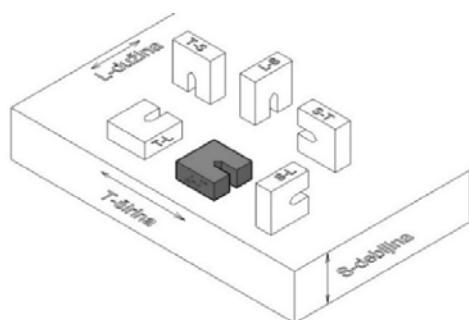
Slika 5 - Uzorkovane epruvete [5]

### 2.2 Ispitivanje primjenom mehanike loma

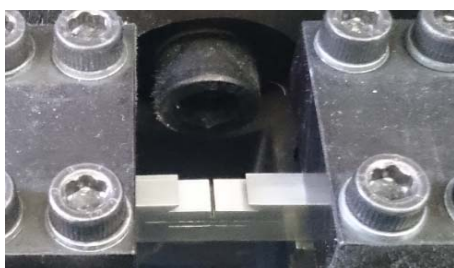
Ispitivanje uzoraka primjenom mehanike loma izvršeno je u OM, ZUT-u (zona uticaja toplote) i MŠ. U skladu sa standardom ASTM E1820-20A [7] za ova ispitivanja korišćena je epruveta tipa Single Edge Bend SE(B) uzorak (slika 6), dok je šema orijentacija uzorkovanja epruvete iz ploče L-T data na slici 7. Formiranje zamorne prsline je izvršeno na uređaju Rumul Cractronic (slika 8), a ispitivanje mehanike loma zavarnog spoja izvršeno je na uređaju SMITWELD 1405 (slika 9) [5].



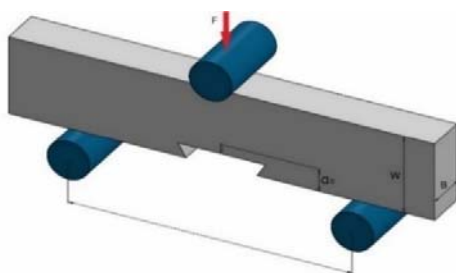
Slika 6 - Geometrija SENB epruvete



Slika 7 - Obilježavanje orijentacije epruveta pri uzorkovanju iz lima



Slika 8 - Formiranje zamorne prsline na uređaju Rumul Cractronic



a)



b)

Slika 9 - Ispitivanje SENB epruvete: šema (a) i na uređaju Smitweld 1405 (b)

Mehanika loma je nauka koja se zasniva na matematičkom opisu polja napona koji okružuju prslinu u opterećenom tijelu. Kada se lom posmatra kao završna faza razvoja prsline, tada je lom epruvete uslovljen lokalnim procesima. Dakle, ukupna otpornost epruvete na lom zavisi od lokalnih poremećaja. Završna faza deformacije je lom epruvete. Prema definiciji, postoji potpuni i nepotpuni lom [8].

Linearno elastična mehanika loma (LEL) primjenjuje se sve dok je veličina plastične zone na vrhu prsline mala u poređenju sa dužinom prsline. U slučaju kada je veličina plastične zone veća (dominantno ravno stanje napona), ali je i dalje značajno manja od prsline, procjena nosivosti elementa se dobija pomoću modifikovane LEML, tj. Koristeći R-krive. Kada je veličina plastične zone mnogo veća u odnosu na dužinu prsline primjenjuje se elasto plastična mehanika loma (EPML) [9].

Faktor intenziteta napona  $K_I$  je jedan od osnovnih faktora u oblasti mehanike loma. Faktorom  $K_I$  opisuje se naponsko deformaciono stanje u okolini vrha prsline koje je uzrokovano dejstvom opterećenja koje je udaljeno ili postupkom zaostalih napona u strukturi [10]. Prema autorima Sedmaku i Anyami [11] faktor intenziteta napona predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije. Kritična vrijednost ovog faktora naziva se žilavost loma ( $K_{Ic}$ ) i predstavlja fundamentalno svojstvo materijala. Osnovni izraz za određivanje faktora intenziteta napona je:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

gdje su:

$Y$  – bezdimenzioni geometrijski parametar,

$\sigma$  (MPa) – napon u presjeku dovoljno udaljenom od vrha prsline i

$a$  (m) – dužina prsline.

Drugi važan faktor koji se bavi analizom u oblasti EPML je otvaranje vrha prsline CTOD ( $\sigma$ ). Ovaj parametar se dobija mjerenjem na određenom rastojanju od vrha prsline. Zbog jednostavnosti određivanja, parametar CTOD ( $\sigma$ ) ima veliku praktičnu primjenu [10, 11].

Faktor intenziteta napona za korišćenu SENB epruvetu se određuje pomoću izraza [9]:

$$K_I = \frac{PS}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\sqrt{\frac{a}{W}}\{1,99 - \frac{a}{W}(1 - \frac{a}{W})[2,15 - 3,93(\frac{a}{W}) + 2,7(\frac{a}{W})^2]\}}{2(1 + 2\frac{a}{W})(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

gdje su:

- $W$  (m) – debljina SENB epruvete,
- $B$  (m) – širina SENB epruvete,
- $S (= 4W)$  (m) – raspon oslonaca i
- $P$  (kN) – intezitet sile opterećenja.

Rice je 1968. godine postavio teorijske osnove J integrala, koji je po njemu i dobio ime - Rajsov integral. Prema [10], J integral je faktor koji se bavi analizom u oblasti EPML, nezavisan je od putanje integracije, a karakteriše se sledećim svojstvima:

- mogućnost primjene u LEML i EPML,
- njegovu vrijednost moguće je odrediti numerički, analitički i eksperimentalno i
- predstavlja energetski parametar.

Vrijednost J integrala, izračunava se prema izrazu [7, 9]:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (5)$$

gdje su:

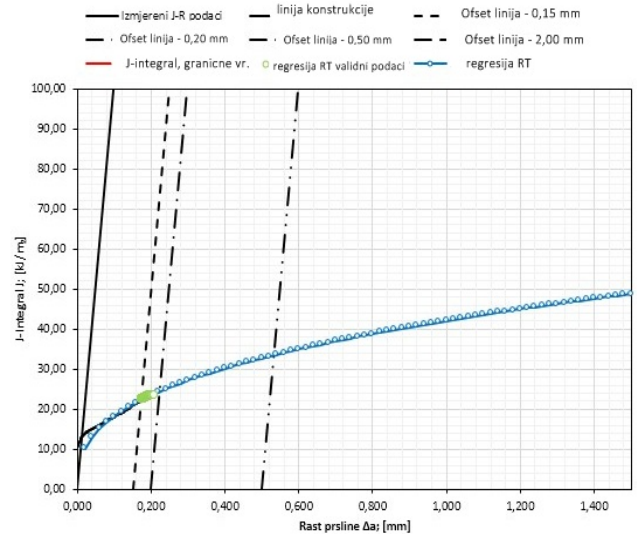
- $J_{el}$  – elastična komponenta J integrala
- $J_{pl}$  – plastična komponenta J integral.

Vrijednost  $J_{IC}$  karakteriše žilavost materijala u blizini izduženja prsline.

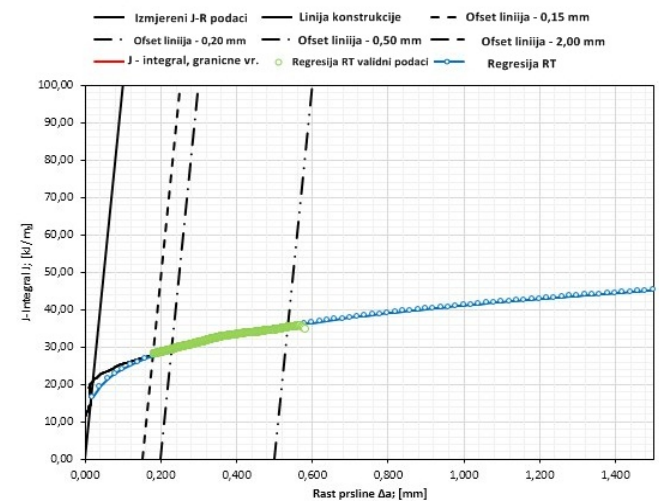
### 3 REZULTATI

Postupak određivanja vrijednosti  $J_{IC}$  definisan je standardom ASTM E1820-20A [7]. Na slikama 10-12 prikazani su karakteristični, eksperimentalno dobijeni, dijagrami  $J-\Delta a$  koji nam služe za određivanje vrijednosti karakteristike žilavosti materijala,  $J_{IC}$ .

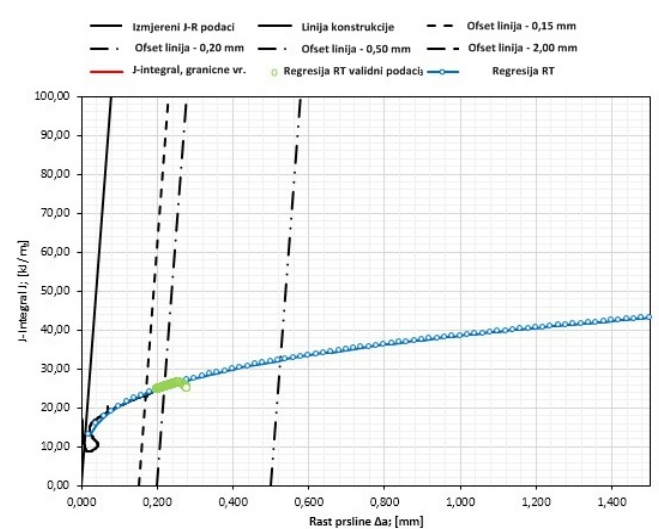
Pri ispitivanju uzoraka zavarenog spoja OM, MŠ i ZUT-a, konstovano je da nijesu ispunjeni svi uslovi ispitivanja koji su definisani standardom ASTM E1820. Budući da su neispunjeni uslovi u obilježavanju J-integrala figuriše JQ umjesti J<sub>IC</sub>.



Slika 10 - J - integral kriva otpornosti za OM



Slika 11 - J - integral kriva otpornosti za MŠ



Slika 12 - J - integral kriva otpornosti za ZUT

#### 4 DISKUSIJA

Upoređujući dobijene vrijednosti parametara J-integrala (Tab. 1), možemo konstatovati da najveće vrijednosti koje definišu duktilnost materijala ima MŠ. Rezultati za OM i ZUT su veoma bliski. Kao generalni zaključak može se izvesti da su OM i zavareni spoj izrazito duktilni. Ovu konstataciju potvrđuje i činjenica da je prslina kod MŠ otvorena veoma malo 1,7 mm, dok je kod OM i ZUT-a ovo otvaranje nešto veće ali i dalje izrazito male vrijednosti od 2,6 mm.

Tabela 1. Prikaz dobijenih vrijednosti J-integrala

	$J_{Q(1)}$ , KJ/m <sup>2</sup>
OM	24,37
ZUT	25,25
MŠ	29,08

Na konačne rezultate uticale su i usvajane karakteristike materijala. Za MŠ, mehanička svojstva dodatnog materijala su bila osnov za proračun karakteristika MŠ. Kod OM usvojene su vrijednosti mehaničkih svojstava dobijena eksperimentalnim putem, a za ZUT usvojena su mehanička svojstva koja je ponudio proizvođač u listama šarže proizvoda. Sve epruvete pri mehaničkom ispitivanju na zatezanje polomile su se u OM, a ne u ZUT-u ili MŠ [5].

Zbog neispunjenosti uslova definisanih standardom ASTM E1820-20A, vrijednosti rezultata dobijenih za J-integral ne mogu se smatrati prihvatljivim, pa umjesto oznake J1c obilježava se sa JQ(1).

#### 5 ZAKLJUČAK

Neispunjenost uslova ispitivanja mehanike loma je posledica udara plastične zone prsline u zadnji zid epruvete. Rezultati dobijeni za MŠ su najbolji i ukazuju na izraženu duktilnost zavarenog spoja, odnosno MŠ.

Vrh prsline je plastično deformisan, tj. prsline je doživljavala proces zatupljenja, zbog čega njenog napredovanja skoro da nije ni bilo. Ovo je još jedna potvrda visoke duktilnosti ispitivanog dupleks čelika i njegovog MAG zavarenog spoja.

Rast prsline u sve tri zone zavarenog spoja je mali, što ukazuje da se radi o izuzetno duktilnom zavarenom

spoju tj. njegove zone posjeduju visok stepen otpornosti na mehanički lom.

#### 6 LITERATURA

- [1] AK Steel, Stainless steel comparator, 2015, <https://hrv.mentorbizlist.com/4295994-duplex-steel-description-characteristics-and-features>, pristupano 06.01.2020
- [2] Juraga J., Šimunović V., Stojanović I., Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, Pula, 2007, str. 1-4
- [3] Babić N., Diplomski zadatak – A-TIG zavarivanje dupleks čelika – A-TIG welding of duplex stainless steel, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014, str. 10-30, 56-64
- [4] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1357631301-0-ssnc\\_9i10\\_pred\\_tekst.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf), pristupano 28.12.2019, str. 1-15
- [5] M. Marić, Istraživanje mogućnosti primjene MAG postupka za zavarivanje dupleks čelika 1.4462, Magistarski rad, jul 2021. godine, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet.
- [6] M. Marić, D. Bajić, T. Vuherert, Welding duplex stainless steel with MAG welding procedure, ASR International Conference "Welding 2021"/Conferința internațională ASR, "Sudura 2021", 22-23.04.2021., România.
- [7] ASTM E1820-20A Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- [8] Miličić D. M., Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš 2020.
- [9] Čulafić B. V., Mehanika loma, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet u Podgorici, Podgorica 1999.
- [10] Živojinović D.D., Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legure aluminijuma, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [11] Sedmak A., Anyiam H.A., Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije, 2001.



## Friction Stir welding - Development and Application

### Zavarivanje trenjem sa miješanjem - razvoj i primjena

N. Šibalić\*<sup>1</sup>, M. Vukčević<sup>1</sup> and M. Mumović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Montenegro, Faculty of Mechanical Engineering, Džordža Vašingtona bb, Podgorica, Montenegro

**Abstract:** The paper presents the process of Friction Stir Welding, then gives a brief history of development, application in industry, adopted terminology of the process, as well as an review of selected research. The essence of the process is welding in the solid state, where melting of the material is avoided, which FSW classifies as an ecologically clean and energy efficient process, with exceptionally good and reliable characteristics of the welded joint. A great advantage is in joining hard-to-weld similar and dissimilar materials, using a rotating tool, with heat generation, so that the material is heated, plastically deformed and joined in a warm state. It is widely applied in welding butt joints of aluminum alloy plates in one pass with a thickness of 0.3 mm to 75 mm. The paper also provides an overview of a number of researches on the Friction Stir Welding process, which relate to: plates of different thicknesses and materials, different joint types, analysis of the microstructure of the welded joint, flow of materials, determination of temperature and force components, numerical simulations and mechanical testing. The future directions of the development of this technology are also given.

**Keywords:** Friction stir welding - FSW, aluminium alloys, process terminology, energy efficiency

**Apstakt:** Rad se odnosi na prikaz postupka Zavarivanja trenjem sa miješanjem (Friction Stir Welding), zatim daje kratku istoriju razvoja, primjenu u industriji, usvojenu terminologiju postupka, kao i pregled izabranih istraživanja. Suština procesa je zavarivanje u čvrstom stanju, gdje je izbjegnuto topljenje materijala, što postupak FSW svrstava u ekološki čiste i energetske efikasne postupke, sa izuzetno dobrim i pouzdanim karakteristikama zavarenog spoja. Velika prednost je u spajanju teško zavarivih istorodnih i raznorodnih materijala, korišćenjem rotirajućeg alata, uz generisanje toplote, tako da se materijal zagrijava, plastično deformiše i spaja u toplom stanju. Najveća primjena je kod zavarivanja sučeonih spojeva lima od legure aluminijuma u jednom prolazu debljine od 0.3 mm do 75 mm. U radu je dat i pregled jednog broja istraživanja postupka Zavarivanja trenjem sa miješanjem, koja se odnose na: limove različitih debljina i materijala, različitih spojeva, analizu mikrostrukture zavarenog spoja, tečenje materijala, praćenje temperature i komponenata sila, numeričke simulacije i mehanička ispitivanja. Dati su i budući pravci razvoja ove tehnologije.

**Ključne riječi:** Zavarivanje trenjem sa miješanjem - FSW, legure aluminijuma, terminologija postupka, energetska efikasnost

## 1 UVOD

Zavarivanje trenjem sa miješanjem je nekonvencionalni postupak zavarivanja koji je poznat pod akronimom FSW (Friction Stir Welding). Prema standardu EN ISO 4063:2023, postupak FSW je definisan kao tip 43, sa tri podtipa: 431 Friction stir spot welding, 432 Refill friction stir spot welding i 433 Stitch friction stir spot welding, koji pripadaju postupcima grupe 4 Welding with pressure. Patentiran je na Institutu

za zavarivanje (The Welding Institute - TWI) u Ujedinjenom Kraljevstvu 1991. godine kao tehnika spajanja u čvrstom stanju, odnosno bez topljenja materijala i prvobitno se primjenjivao samo na legure aluminijuma [1-6]. FSW pripada grupi ekološki čistih postupaka i ne zagađuje životnu sredinu. Za razliku od konvencionalnih postupaka zavarivanja, kod FSW postupka nema dodatnog materijala, nema zaštitnog gasa, nema štetnih isparenja, kao ni štetnog zračenja.

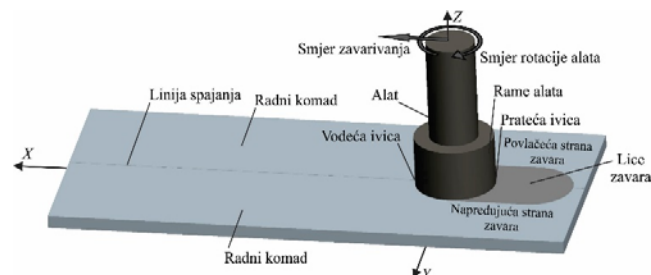
\* nikola@ucg.ac.me



Takođe, postupak je energetski efikasan jer se energija ne troši za topljenje materijala, već samo za pokretanje elektromotora mašine za zavarivanje. Tako da je primjena postupka FSW u industrijske svrhe izuzetno isplativa, jer se ostvaruju velike uštede električne energije. Postupak FSW je pronašao svoju primjenu gotovo u svim granama industrije, a najviše u svemirskoj, avionskoj, brodogradnji, željezničkoj, a u skorije vrijeme i auto industriji. Odlikuju ga izuzetno dobre karakteristike zavarenog spoja, mogućnosti zavarivanja limova većih debljina, a kao najznačajnija odlika je zavarivanje teško zavarivih istorodnih materijala, kao i zavarivanje raznorodnih materijala. Ovim postupkom najviše se zavaruju istorodni materijali legure aluminijuma, legure bakra, legure magnezijumu, čelik, legure titanijuma itd, kao i raznorodni materijali aluminijum i bakar, aluminijum i čelik itd. Postupak FSW se izvodi na mašini za zavarivanje, univerzalnoj glodalici, CNC mašini ili korišćenjem specijalizovane robotske ruke. Ove mašine prema tipu upravljanja mogu biti kontrolisane položajem i kontrolisane pritiskom.

Postupak se odvija tako što se koristi alat za zavarivanje, koji je cilindričnog oblika. Alat se sastoji od dva koncentrična dijela različitih prečnika. Dio alata većeg prečnika se naziva rame alata (shoulder), dok se dio alata manjeg prečnika naziva trn alata (pin) [1-6]. Rame alata može biti sa upuštenim dijelom, dok je trn alat najčešće konusnog oblika, a može biti profilisan sa zavojnicom ili sa različitim oblicima žljebova. Alat za zavarivanje se okreće velikom brzinom rotacije koja zavisi prvenstveno od vrste i debljine materijala. Odvijanje procesa se dijeli u dvije faze (Slika 1). U prvoj fazi alat se kreće aksijalno i zariva se u materijal. Tom prilikom se generiše toplota usled trenja koje se stvara između radnih komada i površine trna alata, kao i usled plastične deformacije materijala. Kada rame alata dohvati površinu radnog komada i alat počne da se kreće longitudinalno počinje druga faza ili faza zavarivanja materijala, gdje dolazi do mehaničkog miješanja i spajanja materijala [6, 7]. Nakon prolaska alata, duž linije spoja, iza ramena alata se stvara brazda glatkog zagrijanog materijala koji se hladi, a između radnih komada, se formira monolitan spoj, dok se donja

površina radnog komada formira na oslonoj ploči, koja je glatka i ravna. U toku odvijanja ove faze pored ranije navedenih izvora toplote, najveći dio toplote se dobija usled trenja ramena alata o površinu radnih komada [6, 7]. Tako na generisanje toplote najveći uticaj imaju geometrijski parametri alata i kinematski parametri koji direktno utiču na kvalitet zavarenog spoja.



Slika 1 - Alat i radni komadi

Kod postupka FSW, zavareni spoj (zavar) je asimetričan, pa su definisane napredujuća i povlačeća strana zavara. Napredujuća strana zavara je definisana kao strana gdje se poklapaju smjerovi vektora brzine rotacije alata i vektora brzine zavarivanja. Povlačeća strana zavara je definisana kao strana gdje su suprotni smjerovi vektora brzine rotacije alata i vektora brzine zavarivanja. Vodeća ivica je prednji dio alata, a prateća ivica je zadnji dio alata. Lice zavara je gornja površina zavarenih radnih komada koja se formira posle prolaska alata, a korijen zavara je donja površina.

Na licu zavara se nalaze karakteristični otisci od alata u obliku polukružnih rubova. Razmak između dva ruba odgovara putu koji pređe alat po radnim komadima u smjeru zavarivanja za vrijeme jedne rotacije.

U zavisnosti od vrste legure i parametara zavarivanja ovi rubovi mogu biti više ili manje uočljivi. Na licu zavara, formira se nesavršenost od viška materijala koji je isturen ili izbačen i tekao je preko gornje površine radnih komada. Ova nesavršenost se često naziva „bljesak” (flash) i dominantna je na povlačećoj strani zavara. Pravilnim izborom parametara zavarivanja i dizajna alata „bljesak” može biti minimiziran. Na kraju procesa u zavaru pojavljuje se izlazna rupa, koja ostaje nakon izlaska alata iz zavarenih radnih komada. Izlazna rupa ima oblik i veličinu koja odgovara geometriji trna korišćenog alata [1-3, 6, 8-10].

## 2 USVOJENA TERMINOLOGIJA

Standard ISO 25239-1:2020 se odnosi na zavarivanje aluminijuma postupkom FSW, gdje je definisana terminologija. U Tabeli 1 dati su usvojeni termini [11] koji se koriste kod postupka FSW.

Tabela 1 – Terminologija kod postupka FSW

Termin:	Eng.
Radni komad	<i>Workpiece</i>
Alat za zavarivanje	<i>Tool</i>
Rame alata - dio alata većeg prečnika koji je u kontaktu sa površinom osnovnog materijala	<i>Shoulder</i>
Trn alata - dio alata manjeg prečnika koji prodire u osnovni materijal	<i>Pin</i>
Bobin alat - alat za zavarivanje sa dva ramena odvojena trnom fiksne ili podesive visine	<i>Bobbin tool</i>
Lice zavara	<i>Weld face</i>
Povlačeća strana zavara	<i>Retreating side of weld</i>
Napredujuća strana zavara	<i>Advancing side of weld</i>
Izlazna rupa	<i>Exit hole</i>
Vodeća ivica	<i>Leading edge</i>
Prateća ivica	<i>Trailing edge</i>
Vodeća strana trna alata	<i>Pin leading face</i>
Prateća strana trna alata	<i>Pin trailing face</i>
Osnovni materijal	<i>Parent material</i>
Zona uticaja toplote - ZUT	<i>Heat affected zone - HAZ</i>
Zona termo-mehaničkog uticaja - ZTMU	<i>Thermo-mechanically affected zone -TMAZ</i>
„Grumen” ili Zona intenzivnog miješanja	<i>Weld nugget or Stirred zone</i>
Ravanska pukotina	<i>Planar flaw</i>
Praznina u zavaru	<i>Void</i>
„Tunel” defekt	<i>Tunnel defect (wormhole)</i>
„Bljesak” - nesavršenost od isturenog ili izbačenog materijala na licu zavara	<i>Flash</i>
Rukavac - oblast od materijala koji je tekao ispod ramena alata, a iznad „grumena”	<i>Flow arm</i>
Depresija lica zavara	<i>Underfill</i>

Brzina zavarivanja - translatorna brzina alata	<i>Welding speed</i>
Brzina rotacije - ugaona brzina alata	<i>Rotation speed</i>
Rotacija u smjeru kazaljke na satu gledano odozgo na alat	<i>Clockwise rotation</i>
Ugao nagiba alata - ugao ose alata nagnut u odnosu na normalu površine radnih komada, suprotno smjeru pravca zavarivanja	<i>Tilt angle</i>
Bočni ugao nagiba alata - ugao ose alata nagnut u odnosu na normalu površine radnih komada, ka povlačećoj strani zavara	<i>Side tilt angle</i>
Dubina prodiranja - dubina do koje prodire najniži dio ramena alata kada postoji ugao nagiba alata	<i>Heel plunge depth</i>
Otisak ramena alata u konataktu sa površinom radnog komada	<i>Tool shoulder footprint</i>
Longitudinalna sila - $X$	<i>Longitudinal force - <math>X</math></i>
Bočna sila - $Y$	<i>Side force - <math>Y</math></i>
Aksijalna sila - $Z$ ili Sila zavarivanja	<i>Axial force - <math>Z</math>, or Welding force</i>
Bočno pomjeranje ose alata od linije spajanja kod zavarivanja raznorodnih materijala	<i>Lateral offset</i>

## 3 MIKROSTRUKTURNE ZONE

Postoji više različitih termina koji opisuju mikrostrukturne promjene kod postupka FSW. Asimetrična priroda zavara i neobičan oblik stepenastog alata, usloveli su da, kao rezultat zavarenog spoja imamo veoma karakterističnu mikrostrukturu. Podjela na mikrostrukturne zone je usvojena na TWI institutu, tako da se prilikom odvijanja procesa zavarivanja javljaju četiri zone: zona osnovnog materijala, zona uticaja toplote, zona termo-mehaničkog uticaja i takozvana „grumen” zona, odnosno zona intenzivnog miješanja materijala koja je dio zone termo-mehaničkog uticaja [6, 12].

U zoni osnovnog materijala nema plastičnog deformisanja materijala, niti uticaja toplote, koji mogu uticati na mehaničke osobine, tako da u zoni osnovnog materijala nema mikrostrukturnih promjena. Zona

uticaja toplote je zajednička za sve procese zavarivanja, pa postoji i kod procesa FSW. Ova zona je izložena toplotnom uticaju, ali ne dolazi do plastičnih deformacija. Tokom procesa zavarivanja, materijal je pretrpio određeni termički ciklus koji dovodi do promjena mehaničkih osobina i mikrostrukture. Veličina zone uticaja toplote direktno zavisi od količine unijete toplote. Temperature u ovoj zoni su niže od temperatura u zoni termo-mehaničkog uticaja, ali još uvijek imaju značajan efekat, ako je mikrostruktura termalno nestabilna [6, 12]. U zoni termo-mehaničkog uticaja, materijal je izložen plastičnim deformacijama i toplotnim uticajima od strane alata koji se javljaju na obje strane zone miješanja. Kod aluminijuma u zoni miješanja jasno se izdvajaju tri oblasti: tzv. „grumen” oblast, oblast izvan „grumena” i oblast rukavaca iznad „grumena”. Oblast izvan „grumena” u manjoj mjeri je deformisana i u zavisnosti od legure, ne mora da bude rekristalizovana. Granica između „grumena” i zone termo-mehaničkog uticaja je jasno vidljiva. Rukavac (flow arm) iznad „grumena”, se formira od materijala koji je tekao ispod ramena alata i povlači se oko prateće strane alata iznad „grumena” i odnosi se ka napredujućoj strani zavara. Zbog nesimetričnosti zavara, napredujuća i povlačeća strana zavara ispoljavaju značajne razlike. Prelaz od „grumena” zavara prema osnovnom materijalu je veoma oštar na napredujućoj strani i više postepen na povlačećoj strani zavara. Oblast manje deformisanog materijala (oblast izvan „grumena”), na napredujućoj strani zavara je veoma uska. Kod drugih materijala ne postoji jasno izražena rekristalizovana oblast „grumena”, već će čitava zona termo-mehaničkog uticaja biti djelimično rekristalizovana. Ovo je karakteristično za materijale koji imaju difuziono kontrolisan i termalno aktiviran fazni preobražaj, koji će dovesti do rekristalizacije [6, 12]. Zona miješanja je („grumen” dinamički rekristalizovana zona) zona velike plastične deformacije materijala, koja odgovara otprilike lokaciji trna alata tokom procesa FSW. Zrna u ovoj zoni su grubo promiješana i često reda veličine manje od veličine zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna u zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja, kreće se od 1  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Ova oblast se formira odmah ispod ramena alata, a širina joj je

neznatno veća od prečnika trna alata. Ova zona se često smatra sub-zonom zone termo-mehaničkog uticaja. Jedinstvena karakteristika ove zone je pojava nekoliko koncentričnih prstenova, koji se nazivaju „luk - prsten” strukture [6, 12].

Prilikom odvijanja procesa zavarivanja kao nepovoljan defekt može se javiti zapreminska greška koja je poznata pod imenom „tunel” defekt, kao rezultat nedovoljnog tečenja materijala oko trna alata do napredujuće strane zavara. „Tunel” defekt najčešće nastaje kada alat napreduje velikom brzinom zavarivanja [13]. Zbog ponovljive prirode odvijanja procesa, „tunel” defekt je neprekidan, pa se kao takav može koristiti i za dobijanje određenih proizvoda.

#### **4 TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPKA**

U osnovne tehnološke parametre postupka FSW spadaju: kinematski (brzina rotacije alata i brzina zavarivanja) i geometrijski (prečnik ramena alata, prečnik trna alata i ugao nagiba trna alata). Pored ovih parametara značajni su i dubina prodiranja ramena alata u materijal, kao i ugao nagiba alata [12, 14, 15-20]. Ovi parametri najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine radnih komada, a njihove optimalne vrijednosti se za sada, određuju isključivo eksperimentalnim putem. Oni moraju biti pravilno odabrani, da bi se obezbijedilo uspješno i efikasno odvijanje procesa zavarivanja [12, 14].

##### **4.1 Brzina zavarivanja i brzina rotacije alata**

Odnos između brzine zavarivanja i toplotne energije u toku procesa zavarivanja je dosta složen, ali generalno se može reći, da će povećanje ili smanjenje brzine zavarivanja rezultirati hladnijim ili toplijim zavarima. U cilju da se dobije što bolji zavar, potrebno je da materijal oko alata bude dovoljno zagrijan da omogući plastično tečenje materijala i smanji silu koja djeluje na alat. Ako materijal nije dovoljno zagrijan, onda je moguće da se javljaju određene praznine ili druge greške koje mogu biti prisutne u zoni miješanja, a u ekstremnim slučajevima može doći i do loma alata. Pretjeran unos toplote može biti štetan za konačan izgled zavara, jer može doći do topljenja materijala. Brzina rotacije alata

tokom odvijanja procesa zavarivanja je konstantna i kreće se kod aluminijuma i njegovih legura u širokim granicama od 200 o/min do 2000 o/min, dok je za neke materijale i veća. Brzina zavarivanja takođe je konstantna i kod zavarivanja legura aluminijuma manje debljine može da iznosi i do 2000 mm/min, ali kod visoko kvalitetnih legura je mnogo manja i kreće se oko 100 mm/min. Brzina zavarivanja  $v$ , brzina rotacije alata, odnosno ugaona brzina alata  $\omega$  i poluprečnik trna alata  $r$  definisani su odnosom  $v/(\omega \cdot r)$  koji se obično kreće u granicama od 0.01 do 0.02 [14].

#### 4.2 Sile kod postupka FSW

Za pravilno odvijanje postupka FSW, izuzetno je važno poznavanje komponenti sila koje djeluju na alat tokom procesa zavarivanja. Komponente sile koje djeluju kod postupka FSW su: aksijalna, longitudinalna i bočna sila.

Aksijalna sila -  $F_z$  je potrebna da održi poziciju alata i materijal ispod površine, odnosno to je u stvari sila kojom alat deluje na materijal. Najveća je u početnom periodu prodiranja trna alata kroz materijal, a zatim se smanjuje, dok rame alata ne dohvati gornju površinu materijala koji se zavaruje. Tada ponovo počinje da raste dok se ne dostigne određena temperatura kad počinje da opada i zadržava svoju konstantnu vrijednost sve do završetka procesa zavarivanja. Kako je komponenta aksijalne sile dominantna kod postupka FSW, ona se često naziva i sila zavarivanja.

Longitudinalna -  $F_x$  djeluje u smjeru kretanja alata, a pozitivan smjer se definiše sa smjerom kretanja alata. Budući da se ova komponenta sile javlja kao posledica otpora materijala kretanju alata, može se očekivati da će ova sila biti veća, ako se smanji temperatura materijala oko alata.

Bočna sila -  $F_y$  djeluje normalno na pravac kretanja alata i pozitivan smjer se definiše ka napredujućoj strani zavara. Ova sila zbog izuzetno malog uticaja na odvijanje procesa u analizi se uglavnom zanemaruje.

## 5 ISTRAŽIVANJA I RAZVOJ POSTUPKA FSW

Dosadašnji nivo istraživanja u laboratoriji Mašinskog fakulteta je na nivou Technology Readiness Level (TRL5), odnosno izvršeno je sučeono zavarivanje legure aluminijuma AA6082-T6, AA6060, AA7049, AA1050, zavarivanje raznorodnih materijala, AA6082-T6 sa CuETP i AA6082-T6 sa čelikom C45, kao i zavarivanje ugaonog spoja legure AA6082-T6, kroz teorijsku analizu, eksperimentalno istraživanje i numeričku simulaciju (Teorija, Eksperiment, Simulacija - TES pristup) [15].

Istraživanja procesa zavarivanja kod postupka FSW, bazirana su prvenstveno na rezultatima eksperimentalnih istraživanja i numeričkih simulacija. Radovi [1-5, 7, 9, 10, 15-20] kroz izvođenje eksperimenta istražuju uticajne parametre zavarivanja, tok materijala, generisanje toplote, sile zavarivanja, određivanje mehaničkih parametara, ispitivanje mehanike loma, kao i određivanje mikrostrukture zavarenog spoja. Postupkom FSW, kroz brojna istraživanja izvršeno je uspješno zavarivanje velikog broja različitih materijala: legura aluminijuma: serije 1XXX (komercijalno čist aluminijum), serije 2XXX (Al-Cu), serije 3XXX (Al-Mn), serije 4XXX (Al-Si), serija 5XXX (Al-Mg), serija 6XXX (Al-Mg-Si), serije 7XXX (Al-Zn) i serije 8XXX (Al-Li i ostali elementi), legura bakra, olova, legura titanijuma, legura magnezijuma, cinka, sintetičkih polimera, niskougljeničnih čelika, čelika austenitne i martenzitne strukture, dupleks čelika kao i legura nikla. Numeričke simulacije postupka FSW istraživane su kroz veliki broj radova, gdje se rezultati simulacija do sada odnose na generisanje i distribuciju toplote, termo-mehaničko modeliranje, analizu sile i tečenje materijala. Bilo je i pokušaja modeliranja primjenom trodimenzionalnih visoko-plastičnih modela. Numerička simulacija kod procesa FSW je bazirana na metodi konačnih elemenata, konačnih razlika i konačnih zapremina. Neka istraživanja daju rezultate sa aspekta transfera toplote za vrijeme procesa zavarivanja trenjem. Trodimenzionalni model transfera toplote kombinuje Ojlerove karakteristike i metod konačnih razlika kod modeliranja

kretanja alata. Termo-mehanički model uključuje i mehaničko miješanje materijala od ramena alata.

Postupak FSW izrodio je čitavu familiju tehnologija, od kojih se najviše koristi kao tehnologija zavarivanja „Welding” i kao tehnologija obrade „Processing”.

U radu [17] je data primjena nove aditivne tehnologije za metal (Additive Friction Stir-Enabled Solid-State Manufacturing), nanošenje aditiva trenjem sa miješanjem, istražuje se za upotrebu u popravci djelova od legure aluminijuma 7075. Popravke uključuju demonstraciju punjenja prolaznih rupa i dugih, širokih žljebova. Ova tehnologija je od interesa za avio industriju, u kojoj se legura aluminijuma AA7075 široko koristi pri proizvodnji zahtjevnih komponenti, zbog dobrih mehaničkih osobina i male gustine.

U radu [18] je predstavljeno tačkasto zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSSW-Refill) legure aluminijuma AA5042, koje se koristi za dobijanje čvrstih spojeva. U radu je izvršeno istraživanje uticaja dubine prodiranja, brzine rotacije i brzine prodiranja na mikrostrukturu i čvrstoću materijala na smicanje. Najuticajni parametri su dubina prodiranja i brzina rotacije alata, dok zapreminski nedostaci koji se javljaju, imaju mali uticaj na mehaničke performanse zavarenih spojeva. Za korelaciju parametara procesa korišćen je softverski paket Statistica.

U radu [19] su upoređeni zavareni spojevi dobijeni postupkom SSFSW (Stationary Shoulder Friction Stir Welding) i postupkom FSW, kod zavarivanja legure aluminijuma visoke čvrstoće AA7050-T7651. Kod oba postupka razmatran je unos toplote, gdje je za optimalne okvirne uslove postupak SSFSW imao 30 % niži unos toplote od FSW postupka, a nerotirajuće rame alata je rezultiralo užim zavarenim spojevima i manjim uticajem ZUT-a. Zavari SSFSW u odnosu na FSW su imali ujednačenija svojstva po debljini i pokazali bolje rezultate u testiranju na zatezanje. Postupak SSFSW je rezultirao daleko boljom završnom obradom površine, iako je stacionarno rame alata dovelo do nastanka površinskih pukotina pod određenim uslovima zavarivanja. Koncept SSFSW postupka prvi je

predložen u radu [20] kako bi se smanjili veliki temperaturni gradijenti kroz debljinu materijala pri zavarivanju legura titanijuma niske toplotne provodljivosti. Kod SSFSW trn alata se rotira kroz sklop ležaja u ramenu alata, koji je pričvršćen za glavu uređaja za zavarivanje. Tokom zavarivanja nerotirajuće rame alata klizi po površini radnog komada, dok se samo trn alata rotira unutar kućišta.

U radu [21] data je uporedna analiza mjerenja dubine prodiranja ramena alata kod zavarivanja bakarnih kanistera debljine zida 50 mm, pomoću četiri različite metode u cilju automatizovanja procesa zavarivanja. Mjerenje se vrši zbog prirode samog procesa, geometrije radnih komada i mašine, jer usled njihovih specifičnosti se ne može osloniti na tačnost položaja alata kao kod konvencionalnih CNC mašina. Ovako zavareni bakarni kanisteri postupkom FSW se koriste za skladištenje nuklearnog otpada. Od bakarnih kanistera se očekuje da budu netaknuti sledećih 100 000 godina, pri čemu debljina bakarnog zida kanistera predstavlja korozionu barijeru.

Rad [22] ističe prednost postupka FSW u odnosu na ostale postupke zavarivanja kod kompozitnih materijala sa metalnom matricom, jer jedino kod ovog postupka ne dolazi do topljenja materijala. U radu su izvršena mehanička i mikrostrukturna ispitivanja da bi se procijenile karakteristike zone zavara i performanse kompozitnih spojeva AA2124/SiC/25p-T4. Fazna struktura šava određena je difrakcijom rendgenskih zraka, dok je temperatura u zoni zavara određena korišćenjem termoparova.

Rad [23] sistematski razmatra ključna tehnička pitanja u proizvodnji rezervoara za gorivo od legure aluminijuma visoke čvrstoće, korišćenjem FSW postupka, gdje se istražuje dizajn alata, optimizacija procesa, tehnike nedestruktivnog ispitivanja Nondestructive Testing - NDT i tehnike popravke defekata, itd., u avio industriji. Da bi se ispunili izuzetno strogi standardi avio industrije, razvijeni su: alati sa pomjerajućim trnom za FSW, metod spajanja Y prstena i dijela rezervoara sa FSW (lock joint), FSW sa konstantnom silom, on-line NDT, kao i kompletan set

opreme u avio industriji za primjenu FSW postupka kod legura aluminijuma.

Rad [24] je imao za cilj da unaprijedi tehnologiju zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSW), visoko energetski efikasnog procesa zavarivanja u čvrstom stanju, za proizvodnju velikih i složenih konstrukcija, kao što su cjevovodi od čelika velike debljine zida sa velikim performansama i za visoke temperature, a postupak se može primijeniti i na terenu. Tehnološke inovacije koje su razvijene u ovom radu pokušale su da riješe dva fundamentalna nedostatka FSW postupka: nemogućnost zavarivanja na terenu i nemogućnost zavarivanja čelika velike debljine zida, što bi proširilo upotrebu FSW postupka u proizvodnji.

Rad [25] istražuje tok kretanja materijala kod postupka FSW eksperimentalnim putem. Daje osnovne odnose i granice dimenzija i oblika alata. Korišćeni su alati sa zavojnicom, gdje je smjer navoja suprotan smjeru okretanja alata, odnosno materijal je guran prema donjoj strani zavara.

Rad [26] daje detaljna objašnjenja kako svaki od geometrijskih parametara alata za zavarivanje utiče na proces i materijale od kojih se alati prave. Alat se najviše oštećuje tokom prodiranja u materijal usled jakih udarnih opterećenja, što je naročito izraženo kod materijala sa malom udarnom žilavošću. Konveksan oblik alata utiče na smanjenje aksijalne sile, dok se optimalan zavar postiže kod alata sa zavojnicom, kada je smjer rotacije suprotan smjeru navoja. Rad daje i uticaj nagiba alata na svojstva zavarenog spoja i definiše odnos 3:1 prečnika ramena alata i debljine materijala.

U radu [27] predstavljena je teorijska i eksperimentalna analiza FSW postupka pri zavarivanju raznorodnih materijala legure aluminijuma AA5083 i čistog bakra. Prilikom procesa zavarivanja alat je pomjeren ka strani mekšeg materijala, u ovom slučaju leguri aluminijuma. Radni komad od legure aluminijuma je postavljen na napredujućoj strani, a čisti bakar na povlaćećoj strani zavara.

Rad [28] opisuje primjenu Computational Fluid Dynamics - CFD analize u softveru FLUENT, na modelovanje trodimenzionalnog kretanja materijala kod

postupka FSW. Standardni alata sa zavojnicom se koristi za analizu, a praćene su veličine: ugao nagiba alata, generisanje toplote i protok toplote. Istraživanje ima za cilj da se bolje razumiju protok materijala oko alata za zavarivanje.

U radu [29] razvijen je alat sa sigurnosnim sistemom koji ima za cilj izbjegavanje preranog oštećenja i omogućava mjerenje primijenjenog pritiska alata. Poboļšani alat je testiran na limovima od legura aluminijuma AA2024-T4 i AA7075-T6. Kvalitet zavarenog spoja je određen analizom mikrostrukture i mjerenjem mikrotvrdoće.

Istraživanje predstavljeno u radu [30] istražuje upotrebu obrtnog momenta umjesto aksijalne sile zavarivanja za kontrolu procesa zavarivanja. Pokazano je, da je kontrola obrtnog momenta ekvivalentna kontroli snage zavarivanja i uzrokuje da se ujednačena količina toplotne energije po jedinici dužine unese u zavareni spoj. Obrtni moment je osjetljiviji na dubinu prodiranja alata od aksijalne sile. Ravno rame alata stvara osjetljiviji region gdje će vrlo mala promena dubine prodiranja proizvesti relativno veliku promjenu obrtnog momenta. Povećani ugao nagiba alata bi mogao da stvori stabilnije sisteme upravljanja eliminisanjem velike i relativno trenutne promjene obrtnog momenta povezane sa ravnim ramenom alata.

## 6 ZAKLJUČANA RAZMATRANJA

Zavarivanje trenjem sa miješanjem je relativno nova i aktuelna tehnologija koja još nije dovoljno istražena. Razvoj tehnologije zavarivanja trenjem sa miješanjem zahtijeva kompleksan TES pristup, za široku klasu različitih oblika spojeva i materijala. Kroz rad je predstavljena primjena postupka FSW, kao i pregled određenog broja istraživanja.

Tehnologija FSW postupka je specifična po svojoj prirodi i zavisi prvenstveno od karakteristika materijala koji se zavaruje, njegove debljine, vrste spoja, kao i od toga da li se zavaruju istorodni ili raznorodni materijali. Tehnologija FSW nam kroz inovativni pristup omogućuje optimizaciju uticajnih parametara, prije svega geometrijskih (prečnika trna alata, ugla nagiba

trna alata i prečnika ramena alata) i kinematskih (brzine zavarivanja i brzine rotacije alata).

Istraživanja su pokazala da je utrošak energije kod postupka FSW mnogo manji nego kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja, a sa ekološkog aspekta je ubjedljivo najčistija tehnologija zavarivanja. Postupak je lako automatizovati, a dobijeni zavareni spojevi imaju visok kvalitet, tako da se zbog svoje pouzdanosti, najviše primjenjuje u avionskoj i svemirskoj industriji.

Osim karakteristika kvaliteta zavarenog spoja, kroz primjenu savremenih kompjuterom numerički upravljanih mašina (CNC mašina) povećava se proizvodnost i ekonomičnost FSW postupka, a samim tim i aplikativnost zbog značajnih prednosti u odnosu na ostale postupke.

Budući pravci razvoja istraživačkog tima laboratorije za FSW Mašinskog fakulteta je TRL8 nivo, odnosno dobiti finalni proizvod visokog kvaliteta u realnim uslovima primjene.

## 7 LITERATURA

- [1] Wayne, M.T. et al. (1991). Friction Stir Butt Welding. International Patent Application No PCT/GB92/02203; Wayne M.T. et al (1995). Friction Stir Butt Welding. GB Patent Application No 9125978.8; Wayne M.T. et al (1995). Friction Stir Butt Welding. US Patent 5.460 317.
- [2] Thomas, W., Threadgill, P., Nicholas, E. (1999). Feasibility of Friction Stir Welding Steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6), 365-372.
- [3] London, B., Mahoney, M., Bingel, W., Calabrese, M., Waldron, D. (2001). Experimental methods for determining material flow in friction stir welds. *Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 27-28 Sept. 2001. 7 pp.
- [4] Ulysse, P. (2002). Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(14), 1549-1557, doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00114-1.
- [5] Arbegast, J. W. (2006). Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Welding Journal*, 85(3), 28-35.
- [6] Mishra, S. R., Mahoney, W. M. (2007). *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, ISBN-13: 978-0-87-87170-840-3
- [7] Song M., Kovacevic R. (2003). Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. *Journal Engineering Manufacture*, 217 Part B, 73-85. doi: 10.1243/095440503762502297
- [8] Jata, K., Mahoney, M., Mishra, R., Lienert, T. (2005). Friction Stir Welding and Processing III, TMS, 0-87339-584-0.
- [9] Defalco, J. (2006). Friction Stir Welding VS. Fusion Welding. *Welding Journal*, 85(3), 42-44.
- [10] Chao, Yuh J., Qi, Xinhai. (1998). Thermal and Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6. *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, 7(2), 215-233, doi:10.1106/LTKR-JFBM-RGMV-WVCF.
- [11] Threadgill, L.P. (2007). Terminology in Friction Stir Welding. *Science and Technology of Welding & Joining*, 12(4), 357-360, doi:10.1179/174329307X197629.
- [12] www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147, 04.05.2023.
- [13] Colligan, K. (1999). Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium. *Welding Journal*, 229-237.
- [14] Stamenković, D., Đurđanović, M., Mitić, D. (2006). Zavarivanje postupkom „FSW”. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2, 59-66.
- [15] Šibalić, N., Vukčević, M. (2019). Numerical Simulation for FSW Process at Welding Aluminium Alloy AA6082-T6. *Metals*, 9(7), 747, doi.org/10.3390/met9070747.
- [16] Ganey, N., Marek, J., Slama, P. (2005). Structure Characteristics of Al-Plate Joined by Friction Stir Welding. *Materials Structure*, 12(2).
- [17] Griffiths, R. J., Petersen, D. T., Garcia, D., Yu, H. Z. (2019). Additive friction stir-enabled solid-state additive manufacturing for the repair of 7075 aluminum alloy. *Appl. Sci.*, 9(17), doi: 10.3390/app9173486.
- [18] Tier, M. D. et al. (2013). The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. *J. Mater. Process. Technol.* 213(2), 997-1005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.12.009.
- [19] Wu, H., Chen, Y. C., Strong, D., Prangnell, P. (2015). Stationary shoulder FSW for joining high strength aluminum alloys. *J. Mater. Process. Technol.*, 221, 187-196, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.015.
- [20] Russell, M. J. et al. (2008). Recent developments in the friction stir welding of titanium alloys. *Welding in the World*, 52(9/10), 12-15.
- [21] Cederqvist, L., Nielsen, I. (2018). Evaluation of depth controller for friction stir welding of copper canisters. *Posiva SKB Report 08*, ISSN 2489-2742.
- [22] Bozkurt, Y., Uzun, H., Salman, S. (2011).

- Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite. *J. Compos. Mater.*, 45(21), 2237-2245, doi: 10.1177/0021998311401067.
- [23] Wang, G., Zhao, Y., Hao, Y. (2018). Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *J. Mater. Sci. Technol.*, 34(1), 73-91, doi: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.
- [24] Feng, Z. et al. (2015). Flexible Friction Stir Joining Technology. Online Available: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1210157/>.
- [25] Guerra, M., Schmidt, C., McClure, J. C., Murr, L. E., Nunes, A. C. (2002). Flow patterns during friction stir welding. *Mater. Charact.*, 49(2), 95-101, doi: 10.1016/S1044-5803(02)00362-5.
- [26] Sharma, S., Handa, A., Singh, S. S. (2021). Influencing geometrical parameters of tools in friction stirring technology: A short review. *Stroj. Cas.*, 71(2), 257-290, doi: 10.2478/scjme-2021-0034.
- [27] Al-Roubaiy, A. O., Nabat, S. M., Batako, A. D. L. (2014). Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71(9-12), 1631-1642, doi: 10.1007/s00170-013-5563-z.
- [28] Colegrove P. A., Shercliff, H. R. (2005). 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *J. Mater. Process. Technol.*, 169(2), 320-327, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.03.015.
- [29] Aissani, M., Gachi, S., Boubenider, F., Benkedda, Y. (2010). Design and optimization of friction stir welding tool. *Mater. Manuf. Process.*, 25(11), 1199-1205, doi: 10.1080/10426910903536733.
- [30] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., Fleming, P. A. (2010). Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 51(9-12), 905-913, doi: 10.1007/s00170-010-2678-3.





## Assembly Process Improvement by Using Lean Tools

### Poboljšanje procesa montaže primjenom Lean alata

G. Guzina<sup>1</sup>, R. Gojković<sup>1</sup>, S. Moljević<sup>1</sup>, M. Jakanović Đajić\*<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Istočno Sarajevo, BiH

<sup>2</sup>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Trebinje, BiH

**Abstract:** Product assembly as the final production process is one of the most important parts, its quality has a great influence on the quality of the product. The goal of using Lean tools is to increase effectiveness, functionality, general improvement of the organization at the level of the entire company, as well as the elimination of unnecessary activities, i.e. losses in the production process. A well-organized and clean assembly process line will be obtained by using Lean tools, which contributes to the improvement of all the previously listed qualities, and therefore the production process. The application of Lean tools in the assembly process allows improvement in the assembly quality, an increase in efficiency and a reduction in the costs of the production process.

**Keywords:** Lean tools, assembly process line, 5S, SMED, waste in the production process

**Apstrakt:** Montaža proizvoda kao završni proizvodni proces je jedan od najvažnijih dijelova, njen kvalitet ima veliki uticaj na kvalitet proizvoda. Cilj upotrebe Lean alata je povećanje efektivnosti, funkcionalnosti, generalno poboljšanje organizacije na nivou cijelog preduzeća, kao i eliminisanje nepotrebnih aktivnosti tj. gubitaka u procesu proizvodnje. Dobro organizovan i čist pogon procesa montaže se dobija upotrebom Lean alata što doprinosi poboljšanju svih prethodno nabrojanih kvaliteta, a samim tim i procesa proizvodnje. Primjena Lean alata u procesu montaže omogućavaju povećanje kvaliteta montaže, povećanje efikasnost i smanjenje troškova procesa proizvodnje.

**Ključne riječi:** Lean alati, proces montaže, 5S, SMED, gubici u procesu proizvodnje

## 1 UVOD

Potruga za poboljšanom produktivnošću bez žrtvovanja kvaliteta i dalje je glavna meta mnogih proizvodnih industrija. To je moguće jedino uz razvoj proizvodnog sistema koji nudi pozitivan odgovor na promjene na tržištu, zahtjevima kupaca i proizvoda. Stoga, proizvodna preduzeća sve više traže prikladne pristupe za postizanje poboljšanja performansi kako bi stekle konkurentsku prednost. Lean filozofija se koristi kao sistem upravljanja za kontinuirano poboljšanje i smanjenje gubitaka tokom proizvodnje [1].

Inicijativa Lean proizvodnje fokusirana je na smanjenje troškova i povećanje prometa sistematskim i kontinuiranim eliminisanjem svih aktivnosti bez dodane vrijednosti. Na konkurentnom tržištu, Lean je "rješenje" za proizvodne industrije za opstanak i uspjeh. Lean proizvodnja pomaže organizacijama da postignu ciljanu produktivnost uvođenjem tehnika i alata koji se lako primjenjuju i održavaju. Fokus na smanjenju i eliminaciji gubitaka omogućava da se ugradi u organizacionu kulturu i pretvori svaki proces u profit. Greške u toku proizvodnog procesa dovode do lošeg razvoja proizvoda, ukoliko se iste ne isprave dolazi do umanjenja vrijednosti i kvaliteta proizvoda i procesa

\* mirjana.jakanovic@fpm.ues.rs.ba

proizvodnje. Lean pristup se fokusira na smanjenje grešaka proizvodnje, procesa montaže kao i na povećanje cjelokupnog kvaliteta [2].

Cilj ovog rada je poboljšanje procesa montaže primjenom Lean alata. Neki od alati koji su korišteni na konkretnom primjeru su: 5S, SMED i KAIZEN (PDCA ciklus).

Montaža kao jedan dio iz procesa proizvodnje predstavlja najvažniji korak za nastanak gotovog proizvoda jer utiče na kreiranje kvaliteta i funkcionalnosti. O važnosti procesa montaže svjedoče podaci koji govore da je oko jedne trećine zaposlenih u proizvodnom procesu angažovano na poslovima vezanim za montažu proizvoda, dok u montažnoj proizvodnji vazduhoplovnih proizvoda (kao što su avionski motori), montažni rad cjelokupne proizvodnje mašina čini više od polovine zaposlenih [3]. Na osnovu navedenog, izvršena je primjena Lean alata u procesu montaže u cilju unapređenja i smanjenja troškova proizvodnje.

Rad je organizovan na način da je, nakon uvodnog dijela, u drugom poglavlju prikazan pregled literature, zatim je dat kratak prikaz podjele Lean alata u trećem poglavlju, studija slučaja je data u četvrtom poglavlju, dok su zaključna razmatranja data u petom poglavlju.

## 2 PREGLED LITERATURE

Kako su se želje kupca sve više javljale i kriterijumi povećavali industrija je morala ići u korak sa razvojem proizvoda. Potrebno je bilo prvo saslušati, zatim razmotriti kao i pretočiti želje kupca u poboljšanja [4]. "Mašina koja je promijenila svijet" je knjiga koja je prvi put predstavila Lean principe, koji glase: vrijednost, tok vrijednosti, tok, sistem povlačenja i savršenstvo. [5].

Faktor koji uvijek utiče na samu implementaciju Lean metodologije jeste ljudski faktor. Uprkos konstantnom rastu broja alata za napredak organizacije ljudi su ti koji svojim ponašanjem i prihvatanjem utiču na implementaciju Lean-a. U velikom broju država širom svijeta vlada se zalaže za implementaciju Lean koncepta u malim i srednjim preduzećima u cilju njihovog progresivnog napretka [6]. Sa dovoljnom

istrajnosti i posvećenosti zaposlenih Lean može obezbijediti okruženje koje povećava samopouzdanje i rad bez stresa [7].

U okviru rada [8] autori su opisali istraživački projekat koji je sproveden 2015. godine u jednoj automobilskoj kompaniji u Poljskoj. Glavni cilj istraživanja je bio da se identifikuju i smanje gubici koji se javljaju u procesu montaže. Da bi smanjili prethodno identifikovane gubitke pomoću PDCA ciklusa implementirana su prva tri koraka 5S metodologije sortiranje, uređivanje i čišćenje (eng. Sort, Straighten, Shine), Kanban police za spajanje dijelova kao dio sistema za povlačenje (eng. Pull system) i četvrti korak 5S metodologije tj. standardizacija (eng. Standardize). Nakon eksterne revizije pola godine nakon implementacije utvrđeno je smanjenje gubitaka za cca. 25 % i povećanje iskorišćenosti kapaciteta za cca. 5%.

Kada je u pitanju građevinska industrija organizacija pomoću Lean alata se ogleda u upotrebi Posljednjeg sistema planiranja (eng. Last Planner System – LPS) za praćenje toka, planiranje razvoja i eliminisanje neizvjesnosti. Primjer implementacije Lean proizvodnje u tekstilnoj industriji je prikazan u radu [11]. Uvođenje Lean proizvodnje proishodi iz potrebe za fleksibilnom proizvodnjom što u tekstilnoj industriji podrazumijeva širok asortiman proizvoda u kratkom vremenskom intervalu (kratak rok isporuke). Ukidanjem sistema progresivnih paketa (PBS) i uvođenjem proizvodnih ćelija teži se ka ispunjenju želja kupca. Za rješavanje navedenih problema korišteno je mapiranje trenutnog/budućeg stanja proizvodnje (VSM), zatim analiza kako bi se identifikovali gubici i uvele promjene. Uvođenjem proizvodnih ćelija olakšan je transport između radnih stanica i izvršena preraspodjela radnog okruženja koje je postalo prilagodljivo izmjenama u skladu s zahtjevima tržišta uz povećanje fleksibilnosti i potrebom za manjim brojem operatera.

U radu [9] autori ističu da su neki od gubitaka previše utrošenog vremena za pronalazak pozicija potrebnih za montažu sklopa čiji je najčešći razlog loše organizovan i lokacijski pozicioniran magacin i loša organizacija montažera.

Pravilno definisanje problema pomoću mapiranja procesa omogućava prikupljanje ključni podataka o problemima koji se javljaju u proizvodnom procesu, analiza prikupljenih podataka i implementacija adekvatnih Lean alata dovode do smanjenja nepotrebnih gubitka [2].

Nekada je nemoguće eliminisati sve aktivnosti koje predstavljaju čiste gubitke. Te aktivnosti predstavljaju sigurnosne aktivnosti u procesu montaže i njihovo postojanje je obavezno ukoliko je riječ o montaži sklopova sa eksplozivnim karakteristikama [10].

Smanjenje greška koja se javljaju u proizvodnim procesima, među kojima je i montaža, se ogleda u praćenju kvaliteta procesa. U radu [3], autori ističu da se kvalitet procesa prati i skladišti na papiru što smanjuje vrijednost podatka i onemogućava detaljnije analize. Elektronskim upravljanjem podacima omogućava se lakši pristup i upravljanje podacima o kvalitetu, informacijama o procesu proizvodnje kao i mogućnost analize i izrade statistike.

### 3 LEAN ALATI

Lean metodologija uključuje skup alata koji omogućavaju preduzećima ostvarenje velike koristi kada ih ispravno implementiraju. Upotreba Lean alata je jednostavan način i jeftino rješenje za postizanje produktivnosti i profitabilnosti, uz kontinualno smanjenje gubitaka. Lean alati su alati koji se lako koriste, angažuju svu organizaciju i osiguravaju posvećenost svih zaposlenih i omogućavaju vidljivost svih rezultata rada zaposlenih.

Lean metodologija se sastoji od primjene metoda, alata i filozofija, a neki od njih su:

- JIT (eng. Just In Time)
  - Kontinualna proizvodnja
  - Sistem povlačenja (eng. Pull system)
  - Proizvodnja u taktu (eng. Tak time)
- Heijunka
- Jidoka

- Smed
  - Poka Yoka
  - Andon
- SMED (eng. Single Minute Exchange of Die)
- 5S
- KAIZEN
  - PDCA ciklus
  - 5 zašto? (eng. 5Why?)

Ukoliko se posmatra proces montaže neki od glavnih problema koji se javljaju u vidu gubitaka su prevelika čekanja usljed loše organizacije radnog mjesta, nepravilne preraspodjele posla, prevelike udaljenosti skladišta neophodne robe, alata i pomoćnih pribora, prevelikog gubljenja vremena na postavljanje pomoćnih pribora i radnih alata na mašine i dr.

Gubici koji se javljaju mogu se pravilno ispratiti i definisati izradom i analizom mape procesa montaže.

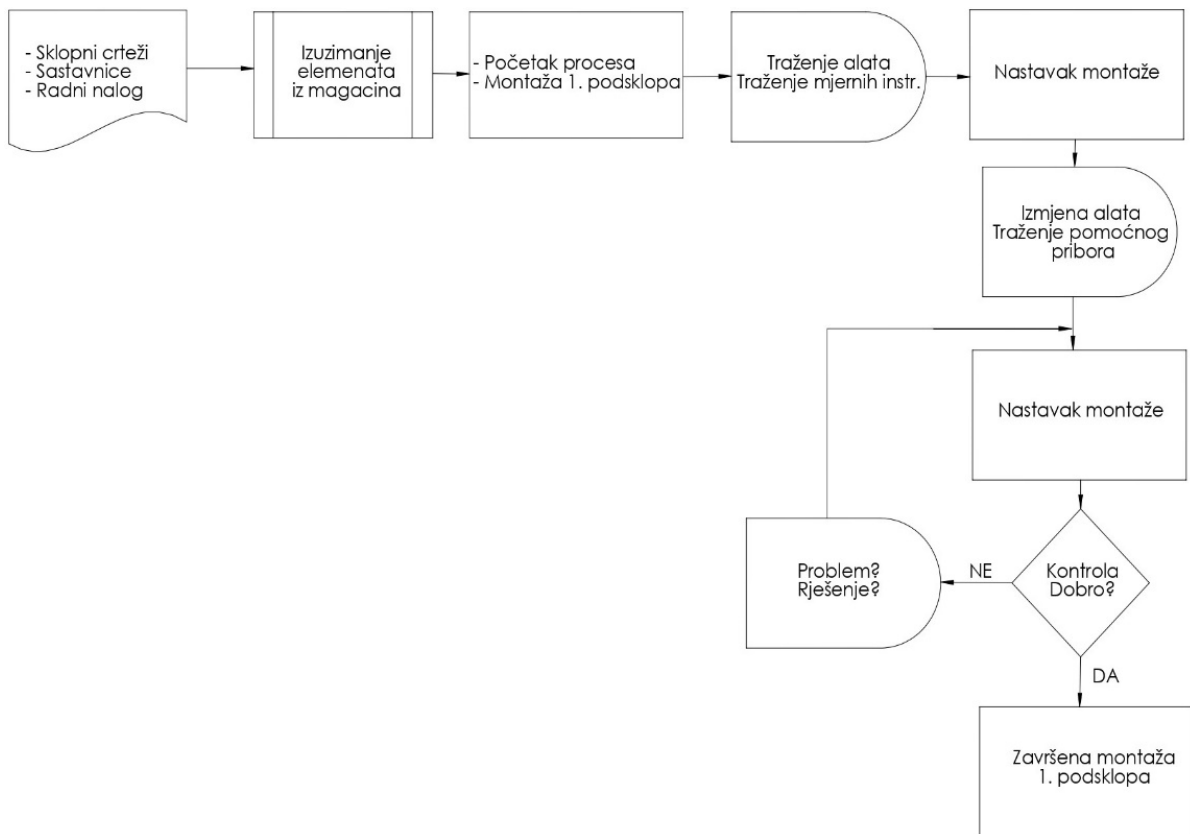
Mnogi autori, pri izradi naučno-istraživačkih radova koji imaju usku poveznicu između teorije i prakse predlažu prvo pravilnu identifikaciju problema, pronalaženje gubitaka, zatim planiranje budućeg stanja i implementaciju Lean alata.

Najčešće korišteni Lean alati u polju procesa montaže su 5S i SMED tehnika brze izmjene alata, čiji tok implementacije prati PDCA ciklus.

### 4 STUDIJA SLUČAJA

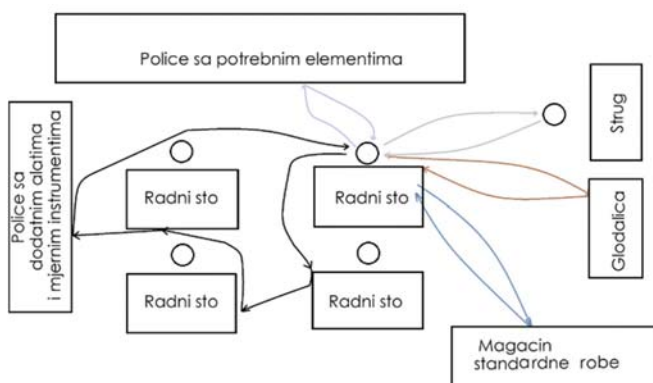
Studija slučaja je prikazana u procesu montaže u preduzeću koje pripada namjenskoj industriji, a koje posluje na području Bosne i Hercegovine. Problem koji se javlja u procesu montaže ogleda se u kašnjenju prilikom izrade glavnog sklopa.

Da bi se pristupilo planiranju načina rješavanja problema bilo je potrebno je izvršiti identifikaciju problema što je urađeno posmatranjem načina montaže podsklopova pri čemu je izrađena mapa procesa montaže (slika 1) i špageti dijagram koji prikazuje kretanja radnika u toku procesa (slika 2).



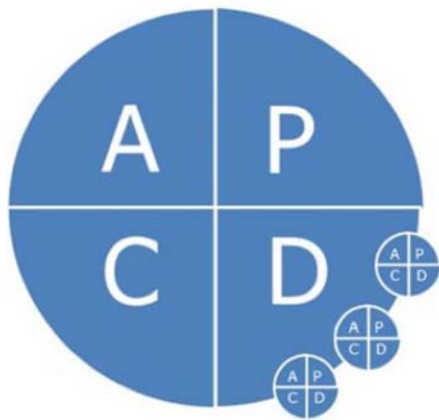
Slika 1 - Mapa procesa montaže

Analizirajući mapu procesa montaže i špageti dijagrama može se uočiti da dolazi do gubitka vremena usljed traženja alata i mjernih instrumenata širom pogona, traženja potrebne standardne robe u magacinu i čekanja operatera na strugu/glodalici da postavi alat i izvede traženi zahvat.



Slika 2 - Špageti dijagram

Kako bi se uklonili gubici i smanjilo vrijeme potrebno za izradu podsklopova potrebno je izraditi plan djelovanja pomoću PDCA ciklusa (slika 3) odnosno izvršiti reorganizaciju pogona montaže i smanjiti vrijeme nepotrebno za izmjenu alata na mašinama. Realizovanje navedenog se vrši implementacijom 5S alata i SMED tehnike.



#### Planiranje

1. Selekcija teme – kašnjenje u procesu montaže sklopa
2. Utvrđivanje cilja uz definisanje finansijskih podataka – ukloniti kašnjenja uz minimalne troškove
3. Izolovanje glavnih uzroka problema – neorganizovanost radnog mjesta, kašnjenje sa pripremom radnih alata i pomoćnih pribora za konvencionalne mašine u pogonu montaže
4. Upotrijebiti Lean alate 5S i SMED

#### Izvođenje

1. Implementacija Lean alata
2. Verifikacija rezultata

#### Kontrola

1. Kontrola postignutih rezultata
2. Verifikacija posljedica i utvrđivanje dostizanja cilja

#### Prilagođavanje

1. Ukoliko je cilj ispunjen standardizovati primjenjeno
2. Ukoliko cilj nije ispunjen vratiti se na početak ciklusa

Slika 3 - PDCA ciklus



Slika 4 -




- a) Radni sto prije primjene 5S
- b) Magacin standardne robe prije primjene 5S

Stanje radnih stolova prije procesa montaže i stanje magacina standardne robe je prikazano na slici 4.

Osnovnih pet koraka implementacije 5S je prikazano u tabeli 1.

Nakon implementacije 5S-a na stolovima se nalaze potrebni alati, pribori i mjerni instrumenti kako radnici ne bi gubili vrijeme u traženju navedenog alata kod kolega koji su na drugom kraju pogona.

Tabela 1. Implementacija 5S

Koraci	Urađeno
<b>Sortiranje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uklanjanje ličnih nepotrebnih predmeta</li> <li>- Sortiranje pomoću 5S kartica</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Razvrstavanje mjernih instrumenata</li> <li>- Razvrstavanje dodatnog alata</li> <li>- Sortiranje standardnih elemenata u magacinu u naznačene kutije</li> </ul>
<b>Uređivanje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skladištenje dobrih komada koji su bili višak u radnom okruženju</li> <li>- Odlaganje loših komada i otpada</li> <li>- Vraćanje mjernih instrumenata na police</li> <li>- Vraćanje dodatnih alata na police</li> <li>- Skladištenje viška standardnih elemenata u magacin u adekvatne kutije sa oznakom</li> </ul> 
<b>Čišćenje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Čišćenje radnih površina i prostora</li> <li>- Čišćenje i pripremanje polica za dijelove koji se izuzimaju iz magacina</li> </ul> 
<b>Standardizovanje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evidentiranje (fotografisanje) stanja nakon prva 3 koraka implementacije 5S</li> <li>- Analiziranje urađeno</li> <li>- Standardizovanje</li> </ul>

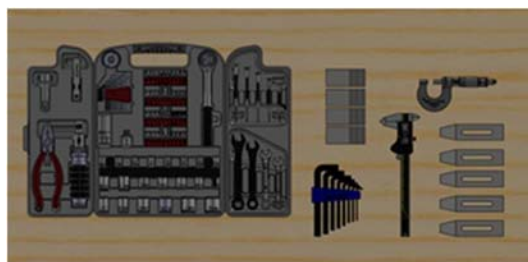
<b>Održavanje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Još jednom ukazati radnicima na bitnost čistih radnih stolova i radnog prostora</li> <li>- Uvesti pravila održavanja</li> </ul>
-------------------	--

Vrijeme čekanja za izvedbu dodatnih operacija kao što je npr. bušenje ili obrada glodanjem u sklopu se smanjuje primjenom SMED tehnike. Kako bi se uočile aktivnosti koje doprinose čekanju izvršeno je posmatranje zatečenog stanja, što je prikazano u tabeli 2.

Tabela 2. Posmatrane aktivnosti

R. br.	Aktivnosti
1	Preuzimanje elemenata koje je potrebno obraditi glodanjem nakon sklapanja
2	Odlazak u magacin po alat
3	Čišćenje mašine od prethodne operacije
4	Odlazak po imbus ključeva
5	Traženje ključeva
6	Postavljanje alata
7	Postavljanje komada u stezni pribor, nije uspjele
8	Odlazak u magacin po pomoćni stezni pribor
9	Postavljanje komada u pomoćni stezni pribor
10	Odlazak po etalone
11	Podešavanje režima obrade
12	Traženje mjernih instrumenata
Ukupno vrijeme pripreme $t = 75$ min	

Aktivnosti kao što su odlazak po imbuse, stezne pribore (npr. stezne šape), etalone, traženje mjernih instrumenata i ključeva je potrebno eliminisati uvođenjem SMED stola (slika 5) na kome će biti dostupno neophodno i nalaziće se u neposrednoj blizini operatera, a pri tome neće otežavati opsluživanje mašine.



Slika 5 - SMED sto

Ostale aktivnosti iz tabele 2 su posmatrane kao interne i eksterne, gdje je odlučeno da eksterne aktivnosti npr. čišćenje mašine od prethodne operacije obavljaju neposredno nakon završetka operacije iz razloga što se potrebe za obradom glodanjem ili bušenjem u sklopu javljaju periodično u procesu montaže. Takođe, predloženo je unaprijed pripremanje potrebnih radnih alata, steznih pomoćnih pribora jer je kroz dokumentaciju definisano šta i kako se radi.

Upotrebom SMED tehnike pripremno vrijeme je smanjeno sa 75 min na 15 minuta.

## 5 ZAKLJUČAK

Obezbijediti konkurentnost firme na današnjem tržištu postaje sve teže. Da bi preduzeće ostalo konkurentno potrebno je ispoštovati želje i zahtjeve kupca počevši od estetskih karakteristika, funkcionalnih, pa do roka isporuke. Upotreba Lean alata doprinosi boljoj organizaciji kako u vrhu preduzeća tako i u procesu proizvodnje. Ukoliko posmatramo proces montaže kao jedan od bitnijih segmenata procesa proizvodnje njena organizacija ima bitnu ulogu u ovoj priči.

Organizacija radnih površina i prostora pomoću 5S alata i upotreba SMED doprinose povećanju produktivnosti, efikasnosti, smanjuju gubitke i mogućnost povređivanja radnika na radnom mjestu te doprinose povećanju samopouzdanja radnika.

Problematika u procesu montaže nije ista za sva preduzeća i zavisi od tematike, vrste posla do same organizacije i načina funkcionisanja preduzeća u cjelini. Motivacija zaposlenih da zadrže promjene i uopšte da im se na samom početku procesa implementacije pridruže ima ključnu ulogu i utiče direktno na krajnje rezultate.

## 6 LITERATURA

- [1] Antonioli, I., Guariente, P., Pereira, T., Ferreira, L. P., & Silva, F. J. G. (2017). Standardization and optimization of an automotive components production line. *Procedia Manufacturing*, 13, 1120-1127.
- [2] Daniyan, I., Adeodu, A., Mpfu, K., Maladzi, R., & Katumba, M. G. K. K. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. *Heliyon*, 8(3), e09043.
- [3] Sun, M. L., & Zhang, X. C. (2012). Assembly process application of lean quality management. In *Advanced Materials Research* (Vol. 347, pp. 225-227). Trans Tech Publications Ltd.
- [4] Perinić, M., Maričić, S., Gržinić, E. (2011). Primjena SMED metode kao jednog od bitnih alata za unaprjeđivanje proizvodnje. *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu*, 53(5), 399-404.
- [5] Womak, J., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The machine that changed the world*. New York: Rawson Associates.
- [6] Stojanović, V.Ž., Stanisavljević, M.S., Kavalić, B.M. (2021). Implementacija Lean u funkciji optimizacije proizvodnje – problemski okvir.
- [7] Vrakela, M. (2021). Istraživanje primene SMED alata u fabrici FKL. *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu*, 36(08), 1400-1403.
- [8] Wojakowski, P., & Warżolek, D. (2017). Application of lean tools to measure and improve work in assembly cell: a case study. *Research in Logistics & Production*, 7(1), 41-51.
- [9] Kanaganayagam, K., Muthuswamy, S., & Damodaran, P. (2015). Lean methodologies to improve assembly line efficiency: An industrial application. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 20(1), 104-116.
- [10] Gunnsteinsson, A. (2011). Analysis of an assembly process of electric detonators with application of lean manufacturing.
- [11] Kumari, R., Quazi, T. Z., & Kumar, R. (2015). Application of lean manufacturing tools in garment industry. *International Journal Of Mechanical Engineering And Information Technology*, 3(1), 976-982.



## Consumption of Electrical Energy in Turning Operations

### Potrošnja električne energije kod obrade struganjem

O. Spaić<sup>1</sup>, A. Koprivica<sup>1\*</sup>, B. Marinović<sup>1</sup>, Lj. Kovačević

<sup>1</sup> Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Vojvode Stepe Stepanovića bb, Trebinje, Bosna i Hercegovina

**Abstract:** In times of increased energy consumption, more and more attention is being paid to finding solutions for its saving. In order to cope with serious situations, such as the rising price of energy, global depletion of resources and climate warming, and the improvement of energy efficiency in industries, the need to conserve energy and its sustainability, and to reduce the emission of damaging gases, is an inevitable trend. Energy efficiency remains one of the main issues in the field of machining. Today's machining systems face a number of new challenges, such as turbulent product demand and variations in production resources. Machining systems consisting mainly of machine tools are numerous and used in a wide range of applications in industry, which typically exhibit very low energy efficiency, and as a result, have great potential for energy savings and reduction of environmental emissions. As machine tools are the basic device that consumes energy in manufacturing industries, as an imperative, the need for optimization of input parameters of machines and modeling of energy consumption is imposed, and this creates prerequisites for saving energy in production. This paper investigates energy consumption in the field of turning operations, as one of the main factors in building a sustainable future of machining, depending on the input technological parameters of machining.

**Keywords:** turning, energy, technological parameters

**Apstrakt:** U vremenu povećane potrošnje energije, sve se više pažnje poklanja iznalaženju rješenja za njenu uštedu. Da bi se izborili sa ozbiljnim situacijama, kao što su rastuća cijena energije, globalno iscrpljivanje resursa i klimatske promjene, te poboljšali energetska efikasnost u industrijama, kao neizbježan trend nameće se potreba za očuvanjem energije i njenom održivosti, te smanjenjem emisije štetnih gasova. Energetska efikasnost je jedno od glavnih pitanja i u domenu mašinske obrade. Današnji obradni sistemi su suočeni sa brojnim izazovima, kao što su turbulentna potražnja za proizvodima i varijacije u proizvodnim resursima. U okviru obradnih sistema se koriste brojni mašinski sistemi u širokom spektru aplikacija, koje obično pokazuju veoma nisku energetska efikasnost. Kao rezultat toga, mašinski sistemi imaju veliki potencijal za uštedu energije i smanjenje emisija štetnih gasova u životnu sredinu. Kako su alatne mašine sa svojim instalacijama i agregatima osnovni podsistem svakog mašinskog sistema koji troši najviše energije u obradnim sistemima, kao imperativ, nameće se potreba za optimizacijom ulaznih parametara i modeliranjem potrošnje energije, te se na taj način stvaraju preduslovi za uštedu energije u proizvodnji. U ovom radu je, na osnovu eksperimentalnih mjerenja, izvršena analiza i postavljen model potrošnje energije u zavisnosti od ulaznih parametara pri mašinskoj obrade struganjem.

**Ključne riječi:** struganje, energija, tehnološki parametri

## 1 UVOD

Proizvodne industrije koriste električnu energiju kako bi pripremak pretvorili u finalni proizvod ili

poluproizvod, a istovremeno proizvode visoku emisiju štetnih gasova. Ove industrije čine preko 60% ukupne svjetske potrošnje energije, dok 70% ukupnog svjetskog

\*aleksandra.koprivica@fpm.ues.rs.ba



zagađenja dolazi od proizvodnih industrija iz Kine [1-3]. Slično tome, u SAD-u, proizvodni sektor čini oko 90%, a sektor mašinske obrade čini oko 83% ukupne industrijske potrošnje energije [4]. Očekivanja su da će globalna potražnja za energijom porasti za 53% u periodu do 2035. godine [5], dok će Kina i Indija, dvije vodeće industrijske zemlje, više nego udvostručiti potražnju za energijom. S toga je neophodno identifikovati metode za procjenu potrošnje proizvodne energije, te na taj način iznaći adekvatan prijedlog efikasne i realne strategije za smanjenje potrošnje prirodnih resursa.

Kao glavana oprema u proizvodnji, alatne mašine imaju mnoge funkcionalne cjeline, kao što su: pogonski sistemi, upravljački sistemi, kontrolni sistemi, pomoćni sistemi, rezni alati, sistemii za stezanje itd. Tako elektromotori obezbjeđuju pravolinijsko ili rotaciono kretanje, hidraulički sistemi obezbjeđuju sile stezanja, sistem za hlađenje i podmazivanje obezbjeđuje dovođenje tečnosti za hlađenje i podmazivanje, nosači alata automatsku zamjenu alata itd. Prema tome, alatna mašina, kao „majka“ svih alatki ima visoku potrošnju električne energije, ali uz malu energetska efikasnost [6]. S toga se veliki broj naučnika bavi uspostavljanjem preciznih modela optimalne potrošnje električne energije.

Gutovski i ostali [7] su u svom radu istakli da se optimizacijom parametara obrade, smanjenjem praznog hoda mašine, te poboljšanjem ukupne energetske efikasnosti znatno utiče na smanjenje potrošnje električne energije i samim tim se postiže održiva proizvodnja. Osim toga u ovom radu dokazano je da je potrošnja energije obrnuto proporcionalna brzini procesa, odnosno specifična energija potrošena za snabdijevanje električnom energijom proizvodne opreme opada sa povećanjem brzine procesa. Pored električne energije potrebne za stvarnu obradu materijala, značajan dio električne energije troši periferna oprema, kada je proizvodna oprema uključena. Yan i ostali [8] proučavali su metod optimizacije parametara obrade na osnovu potrošnje energije, efikasnosti obrade i kvaliteta površine pri CNC glodanju. Bi i Wang su razvili model izračunavanja

energije zasnovan na kinematičkim i dinamičkim modelima alatnih mašina [9].

U ovom radu, na osnovu eksperimentalnih rezultata, postavljen je model potrošnje električne energije u zavisnosti od ulaznih parametara (dubine rezanja, koraka i broja obrtaja), pri obradi struganjem na strugu sa CNC upravljanjem.

## 2 EKSPERIMENTALNE POSTAVKE

Eksperiment je izveden u Laboratoriji Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje, na strugu sa numeričkim upravljanjem “EMCO-CONCEPT 250 CNC”, prema Box-Wilsonovom planu eksperimenta, prikazanom u Tabeli 1, pri obradi struganjem brzoreznog čelika M2, dimenzija Ø10,3 x 60 mm. Kao ulazni parametri procesa rezanja, na dva nivoa su varirani: dubina rezanja  $a$  [mm], broj obrtaja  $n$  [o/min] i posmak (korak)  $s$  [mm/o], a ponavljanje eksperimenta je izvedeno 4 puta u centralnoj tački plana. Struganje je izvedeno alatima (pločicama) od tvrdog metala CCMT 09T304EN-SM.

Tabela 1. Box-Wilson-ov plan eksperimenta

PLAN - MATRICA							
Eks. tačke	Kodirane vrijednosti				Stvarne vrijednosti		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$a$ [mm]	$n$ [o/min]	$s$ [mm/o]
1.	+1	-1	-1	-1	0.35	1500	0.10
2.	+1	+1	-1	-1	1.00	1500	0.10
3.	+1	-1	+1	-1	0.35	2000	0.10
4.	+1	+1	+1	-1	1.00	2000	0.10
5.	+1	-1	-1	+1	0.35	1500	0.15
6.	+1	+1	-1	+1	1.00	1500	0.15
7.	+1	-1	+1	+1	0.35	2000	0.15
8.	+1	+1	+1	+1	1.00	2000	0.15
9.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
10.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
11.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
12.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12

Potrošnja električne energije je mjerena za svakih 40 mm obrade, pomoću digitalnog uređaja za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660, Slika 1.



Slika 1- Uređaj za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660

Digitalni uređaj za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660 imaju sposobnost praćenja potrošnje električne energije u toku obradnog procesa. Podaci mjerenja se putem USB konekcije automatski pohranjuju u pratećem softveru. Mjerenje energije pomoću kliješta PKT – 1660 sa akvizicijom podataka prikazano je na slici 2.



Slika 2 - Mjerenje energije i akvizicija podataka

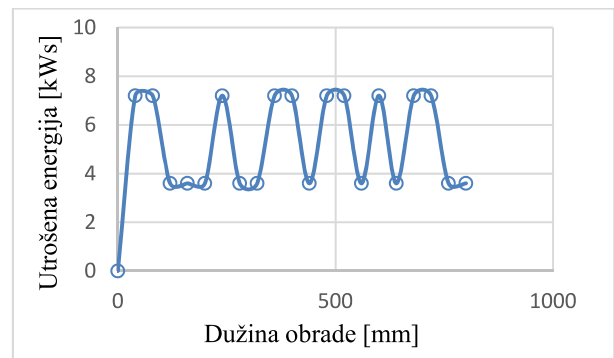
### 3 REZULTATI

Podaci pohranjeni u pratećem softveru, radi lakše obrade, izvezeni su u softverski paket Microsoft Exel.

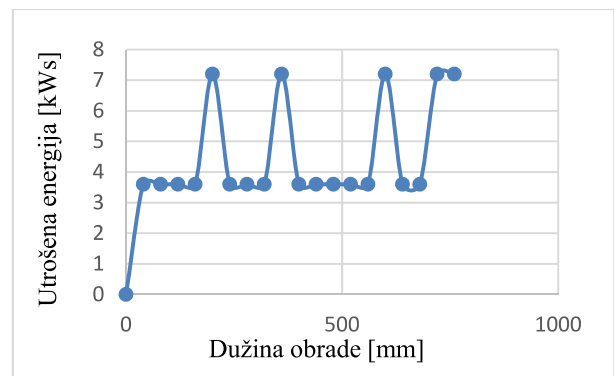
Analiza eksperimentalnih rezultata je pokazala da ulazni tehnološki parametri bitno utiču na potrošnju energije. Najmanja potrošnja energije je pri minimalnoj dubini rezanja (0,35 mm) i maksimalnom broju obrtaja

(2000 o/min) i maksimalnom koraku (0,15 mm/o), dok je maksimalna potrošnja energije pri maksimalnoj dubini rezanja (1 mm), minimalnom broju obrtaja (1500 o/min) i minimalnom koraku (0,1 mm/o).

Na Slici 3 prikazan je grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 1 (minimalni režimi obrade), dok je na Slici 4 prikazan grafik zavisnosti energije u eksperimentalnoj tački 8 (maksimalni režimi obrade).



Slika 3 - Grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 1



Slika 4 - Grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 8

Iz slike 3 i 4 se vidi da je tačnost digitalnog uređaja 0,001 kWh (1 Wh), pa je zbog toga za formiranje matematičkog modela uzeta prosječna potrošnja električne energije u zavisnosti od ulaznih parametara. Prosječna potrošnja energije u eksperimentalnim tačkama prikazana je u Tabeli 2.

Tabela 2. Prosječna potrošnja energije

PLAN - MATRICA														
EKSPER. TAČKE	Kodirane vrijednosti								Stvarne vrijednosti			KOD VRS TE	VEKTOR IZLAZA	
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	a [mm]	n [o/min]	s [mm/o]		Srednja potroš. energije	
														Kodirana vrijednost
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.35	1500	0.10	-1	E <sub>1</sub>	5,443
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1.00	1500	0.10	a	E <sub>2</sub>	6,24
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0.35	2000	0.10	b	E <sub>3</sub>	4,5
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1.00	2000	0.10	ab	E <sub>4</sub>	4,5
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.35	1500	0.15	c	E <sub>5</sub>	3,96
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1.00	1500	0.15	ac	E <sub>6</sub>	4,56
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0.35	2000	0.15	bc	E <sub>7</sub>	3,6
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1.00	2000	0.15	abc	E <sub>8</sub>	4,547
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E <sub>9</sub>	5,22
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E <sub>10</sub>	4,8
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E <sub>11</sub>	4,5
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E <sub>12</sub>	5,22
Koeficijent višestruke regresije	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>123</sub>					Greške: s <sup>2</sup> (y) s(b <sub>0</sub> ) s(b <sub>1</sub> ) s(b <sub>2</sub> ) s(b <sub>3</sub> )	
Osnovni nivo		x <sub>01</sub>	x <sub>02</sub>	x <sub>03</sub>										
Interval varijacija		w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>										
Gornji nivo		x <sub>g1</sub>	x <sub>g2</sub>	x <sub>g3</sub>										
Donji nivo		x <sub>d1</sub>	x <sub>d2</sub>	x <sub>d3</sub>										

U cilju određivanja prosječne potrošnje energije u svim tačkama eksperimentalnog prostora, odnosno u cilju postavljanja matematičkog modela prosječne

potrošnje energije u zavisnosti od ulaznih parametara, primjenom regresione analize određeni su parametri matematičkog modela, koji su navedeni u Tabeli 3.

Tabela 3. Parametri matematičkog modela

Parametri modela	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>123</sub>
	1,55	0,0639	-0,0769	-0,1056	-0,00552	0,0297	0,0524	0,0286
Studentovi kvantiteti	t <sub>b<sub>0</sub></sub>	t <sub>b<sub>1</sub></sub>	t <sub>b<sub>2</sub></sub>	t <sub>b<sub>3</sub></sub>	t <sub>b<sub>12</sub></sub>	t <sub>b<sub>13</sub></sub>	t <sub>b<sub>23</sub></sub>	t <sub>b<sub>123</sub></sub>
	281,51	11.607	-13,97	-19,17	-1,003	5,402	9,512	5,201
Ocjena signifikantnosti	sign.	sign.	sign.	sign.	nesign.	sign.	sign.	sign.

Ocjena signifikantnosti parametara modela prvog i nepotpunog drugog reda izvedena je primjenom Student-ovog kriterijuma za usvojeni nivo značajnosti q = 0,05 i stepene slobode:

$$f_{b_0} = M - 1 = 11 \text{ i}$$

$$f_{b_i} = N - 1 = 7 \quad (1)$$

za koje su tablične vrijednosti studentovih kvantiteta [10]:

$$t_{b_0, 1-q/2, 11} = 2,2 \text{ i}$$

$$t_{b_i, 1-q/2, 7} = 2,36 \quad (2).$$

Izračunati studentovi kvantiteti i ocjena signifikantnosti parametara modela navedeni su u tabeli 3, iz koje se vidi da su signifikantni svi parametri modela

prvog reda i nepotpunog drugog reda, osim parametra  $b_{12}$ .

Na osnovu izračunatih parametara modela može se postaviti empirijski model srednje potrošnje električne energije u obliku:

$$Y = 1.55 + 0.0639x_1 - 0.0769x_2 - 0.1056x_3 \quad (3).$$

Vraćanjem na prvobitne koordinate preko jednačina transformacije:

$$\begin{aligned} x_1 &= 2 \frac{\ln D - \ln D_{max}}{\ln D_{max} - \ln D_{min}} + 1 \\ x_2 &= 2 \frac{\ln n - \ln n_{max}}{\ln n_{max} - \ln n_{min}} + 1 \\ x_3 &= 2 \frac{\ln s - \ln s_{max}}{\ln s_{max} - \ln s_{min}} + 1 \end{aligned} \quad (4)$$

došlo se konkretnog matematičkog modela potrošnje električne energije:

$$E = \frac{90,739a^{0,122}}{n^{0,535} \cdot s^{0,521}} \quad (5).$$

Provjera adekvatnosti modela po Fišer-ovom kriterijumu pokazala je da je model adekvatan jer je:

$$F_r = 1,836 < F_{r_{t(5\%;11;7)}} = 9.$$

Prema tome, postavljeni model adekvatno opisuje srednju potrošnju energije, kao funkciju cilja, u obuhvaćenom višefaktornom prostoru.

## 5 ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata, došlo se do zaključka da srednja potrošnja energije značajno zavisi od ulaznih tehnološkim parametrima, a posebno od dubinom rezanja. Tako je najmanja prosječna potrošnja električne energije pri minimalnoj dubini rezanja i maksimalnom broju obrtaja i koraku, a najveća, pri maksimalnoj dubini rezanja, a minimalnom broju obrtaja i posmaku.

Postavljeni matematički model adekvatno opisuje prosječnu potrošnju električne energije.

## Zahvalnost

Zahvalni smo Ministarstvu za naučnotehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske koje je sufinansiralo projekat „Unapređenje tehnologije rezanja optimizacijom ulaznih parametara“ i time doprinijelo da se nabavi potrebna mjerna oprema i da se ovo istraživanje izvrši.

## 6 LITERATURA

- [1] Zhou, L., R, Li, F., Li, F. Y., (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, *Journal of Cleaner Production*. ISSN: 0959-6526, pp. 3721-3734.
- [2] Zhao, G., Hou, C., Qiao, J., Cheng, X., (2016). Energy consumption characteristics evaluation method in turning, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8(11).
- [3] Peng, T., Xu, X., Wang, L., (2014). A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol 33(1), pp. 196-208.
- [4] Liu, F., Xie, J. Liu, S., (2015). A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process, *Journal of Cleaner Production*, 105.
- [5] Diaza, N., Ninomiya, K., Noble, J., Dornfeld, D., (2012). Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, *Procedia CIRP* 1(1), pp. 518-523.
- [6] Cutting Machine Tool's Energy Consumption Model, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 50(7).
- [7] Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., (2006). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes, 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Corpus ID: 7527600.
- [8] Yan, J., Li, L., (2013). Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality, *Journal of Cleaner Production*, Vol. (52), pp. 462-471.
- [9] Bi, Z., Wang, L., (2012). Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 31(4), pp. 420-428.
- [10] Luković R., Nikolić B., (1996). *Primjenjena statistika*, 1. dio – mjerenja, Univerzitet Crne Gore, Podgorica.



## Uticaj parametara sinteze polaznog praha 50.0 wt% Fe, 47.0 wt% BaTiO<sub>3</sub>, 33.0 wt% TiO<sub>2</sub> na magnetna svojstva sinterovanih uzoraka

Z. Vuković<sup>1</sup>, O. Kosić<sup>1</sup>, M. Luković<sup>1</sup>, A. Maričić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka, Svetog Save 65 Čačak, Srbija

**Abstrakt:** Polazni prah 50.0 wt% Fe, 47.0 wt% BaTiO<sub>3</sub>, 3.0 wt% TiO<sub>2</sub> aktiviran je u planetarnom mlinu u intervalu od 0 do 220 min sa koracima od 20 min. XRD i SEM analizom aktiviranih prahova pokazano je da se sa povećanjem vremena aktivacije menja hemijski sastav praha. Istovremeno dimenzije čestica praha se smanjuju, a raste gustina defekata i mehaničkih mikronaprezanja u prahu. Jedan uzorak polaznog praha aktiviran je 10h, a potom kalcinisan na 1000°C u toku 4h. Kalcinisan prah presovan je u primenjenom magnetnom polju indukcije  $B = 0,85T$ . Pokazano je da uzorci presovani u magnetnom polju, nakon sinterovanja imaju povećanu magnetizaciju za oko 10% u odnosu na sinterovane uzorke koji nisu presovani u magnetnom polju. Presovanjem u magnetnom polju dobijen je polikristalni sinterovani orijentisani (anizotropni) uzorak.

**Cljučne riječi:** multiferioci, XLD Difraktogrami, magnetizacija

### 1 UVOD

Multiferioci spadaju u grupu multifunkcionalnih materijala koji imaju najmanje dva feroična svojstva kao što su feromagnetičnost, feroelektričnost, piezoelektričnost i piezomagnetičnost. Feroioci kod kojih se polarizacija može generisati magnetnim poljem, a magnetizacija električnim poljem obično se nazivaju magnetoelektričnim multiferiocima [1]–[4]. Multiferioci materijali sa visokim multiferiocičnim efektom na sobnoj temperaturi u prirodi su veoma retki. Zbog toga je zadnjih nekoliko godina veliki broj istraživača u svetu posvećen sintezi nanomaterijala sa velikom magnetoelektričnom spregom. Tako je recimo za materijal BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> koji poseduje visoku stabilnost na koroziju i habanje, visoku jednoosnu magnetnu anizotropiju, visoku koercitivnost i male troškove proizvodnje, razvijeno nekoliko postupaka dobijanja: koprecipitacijskom metodom, sol-gel metodom, mikro-

emulzijom i kugličnim mlevenjem [5]–[9]. Od tih načina sinteze će zavistiti i njegova mikrostruktura, morfologija, električna i magnetna svojstva [5]–[16]. Tehnikom kugličnog mlevenja nastaju sitne čestice sa velikom kontaktnom površinom i velikom gustinom dislokacija na površini. Ova tehnika je dosta obećavajuća za proizvodnju širokog spektra nanostrukture i magnetnih materijala [7], [15]–[19]. Vreme mlevenja je bitno jer determiniše i morfologiju i mikrostrukturu dobijenih prahova, a time i njihova električna i magnetna svojstva [7], [10], [15]–[19]. Takođe, dielektrične i magnetne osobine mehanohemijски pripremljenog barijumovog heksaferita, prema najnovijim studijama, pokazala su da su se magnetne osobine poboljšale sa povećanim vremenom mlevenja, dok je dielektrična permitivnost pokazala malu promenu [8], [10].

Značajan napredak postignut je i u slojevitim multiferiocima na sobnoj temperaturi (Bi<sub>9</sub>Ti<sub>3</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>27</sub>,

Bi<sub>6</sub>Ti<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>18</sub>, Bi<sub>7</sub>Ti<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O<sub>21</sub>) [20], [21]. Njihova magnetoelektrična (ME) sprega je izrazito velika, za Bi<sub>9</sub>Ti<sub>3</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>27</sub> iznosi 400 mVcm<sup>-1</sup>Oe<sup>-1</sup> što je u odnosu na keramičke multiferoike, čija je ME sprega od 0,1 mVcm<sup>-1</sup>Oe<sup>-1</sup> do 8,28 mVcm<sup>-1</sup>Oe<sup>-1</sup>, veliki napredak.

Savremene primene multiferoičnih materijala su zasnovane na mogućnosti skladištenja podataka magnetnom i električnom polarizacijom. U odnosu na konvencionalne feroelektrične i feromagnetne materijale, multiferoici obezbeđuju znatno veće mogućnosti pri dizajniranju elektronskih komponenti.

## 2 METODOLOGIJA RADA

Prahovi Fe (Aldrich, St. Louis, MO, p.a. 99,99 wt.%) BaTiO<sub>3</sub> (Aldrich, St. Louis, MO, p.a. 99 wt.%) i TiO<sub>2</sub> (Aldrich, St. Louis, MO, p.a. 99 wt.%) pomiješani su u 50:47:3 wt. omjeru i samleveni su u planetarnom kugličnom mlinu (Retsch PM 400) na vazduhu. Vreme mlevenja praha bilo je od 0 do 220 min u koracima od 20 min. Uzorci prahova su presovani na 500 MPa u obliku diska prečnika 8 mm i debljine 1,5 mm. Sinterovani su na vazduhu u laboratorijskoj komornoj peći (Electron) na 1200 °C tokom 2 h.

XRD Difraktogrami su dobijeni pomoću Bruker DM X-ray difrakcionog instrumenta (XRD) u Bragg-Brentano geometriji sa uglom upada od 0,5° pomoću CuKα<sub>1</sub> (λKα<sub>1</sub> = 15,405929 nm) i CuKα<sub>2</sub> (λKα<sub>2</sub> = 15,444274 nm) zračenja. Difrakcioni podaci dobijeni su preko ugla rasipanja 2θ od 10° do 90° s korakom od 0,05°. Tekstura pojedinih kristalnih faza, dobijena je pomoću jednačine [27]:

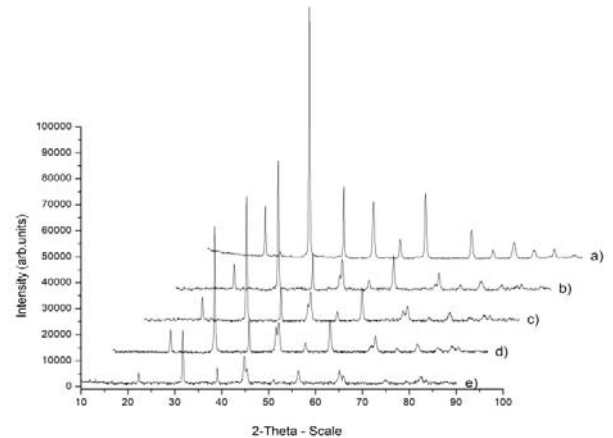
$$T_x = i \left( n^{-1} \sum i_i \right)^{-1} \quad (1)$$

gdje je: T<sub>x</sub> – koeficijent teksture, i – intenzitet pojedine refleksije koja pripada određenoj kristalnoj ravni normalizovan na intenzitet te iste refleksije u referentnom uzorku, i n – ukupan broj refleksija pojedine razmatrane kristalne faze.

Magnetna merenja provedena su modifikovanom Faradajevom metodom koja se temelji na djelovanju nehomogenog magnetnog polja na prah. Merenja magnetne sile izvedena su sa osjetljivošću od 10<sup>-7</sup> N u atmosferi argona.

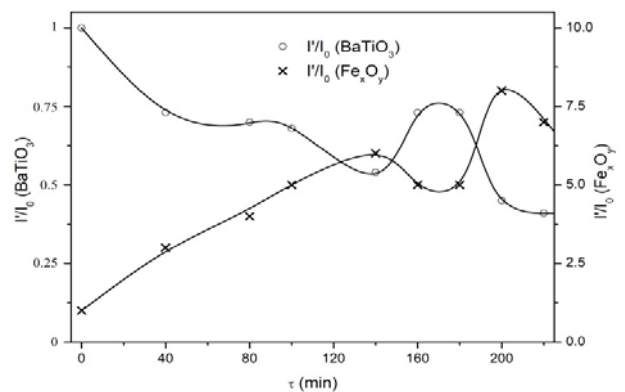
## 3 REZULTATI

Polazni prah 50.0 wt% Fe, 47.0 wt% BaTiO<sub>3</sub>, 3.0 wt% TiO<sub>2</sub> aktiviran je u planetarnom mlinu u intervalu od 0 do 220 min u koracima od 20 min. Na dijagramu 1 prikazani su XRD difraktogrami polaznog i aktiviranih prahova.



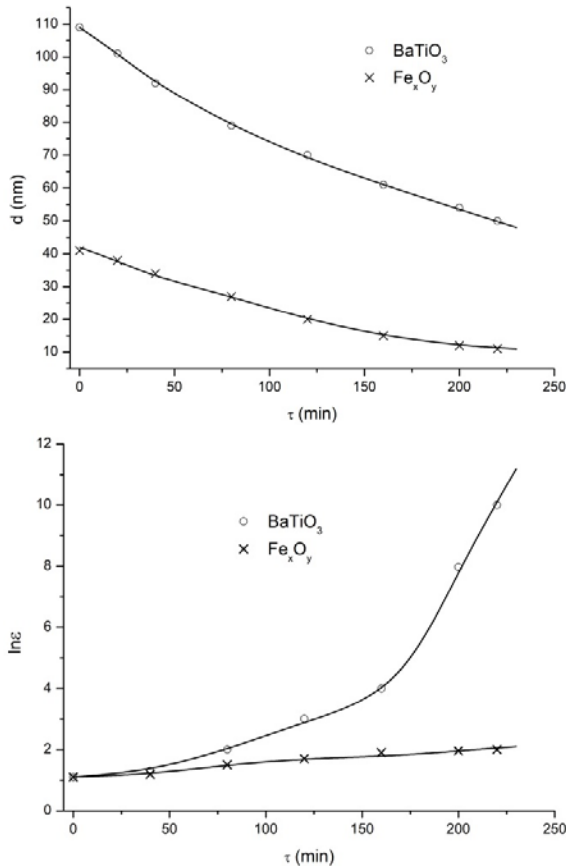
Slika 1 - XRD difraktogrami polaznog praha i aktiviranih prahova: a-0 min, b-60min, c-100min, d.180-min i e-220min.

Na prikazanim XRD difraktogramima na slici 1 javljaju se izraženi pikovi Fe i Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> i BaTiO<sub>3</sub>. Sa porastom vremena aktivacije intenziteti pikova BaTiO<sub>3</sub> opadaju a širine na polovini visine pikova rastu. Pikovi oksida gvožđa sa porastom vremena aktivacije karakteriše istovremeni porast visine i širine pika na poluvisinama. Zavisnost relativne promene pika BaTiO<sub>3</sub> i Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> na 2θ = 65° od vremena aktivacije prikazani su na slici 2.



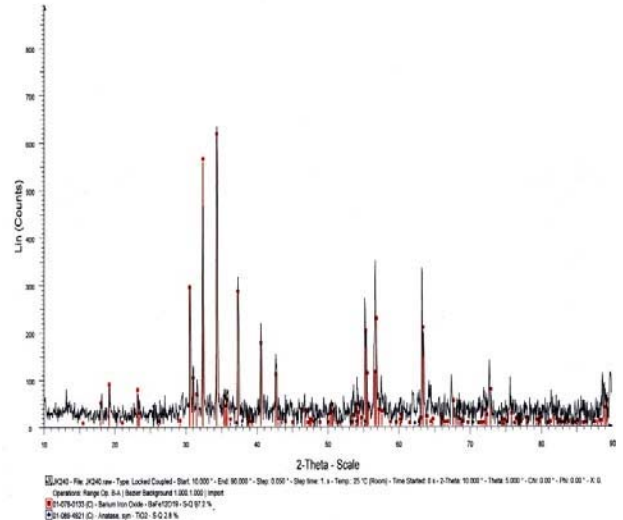
Slika 2 - Zavisnost relativne promene visine pikova BaTiO<sub>3</sub> oksida Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> u blizini 2θ = 60° od vremena aktivacije: -o- BaTiO<sub>3</sub>; -x- Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>.

Porast širine pikova na difraktogramima sa porastom vremena aktivacije uzrokovan je usitnjavanjem kristala kako BaTiO<sub>3</sub> tako i Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. Istovremeno sa porastom vremena aktivacije povećava se gustina defekata i unutrašnjih mikronapreznja (slika 3).



Slika 3 - Zavisnost: a) srednje dimenzije kristala -o- BaTiO<sub>3</sub>; -x- Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> i b) unutrašnjih mikronapreznja -o- BaTiO<sub>3</sub>; -x- Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> od vremena aktivacije.

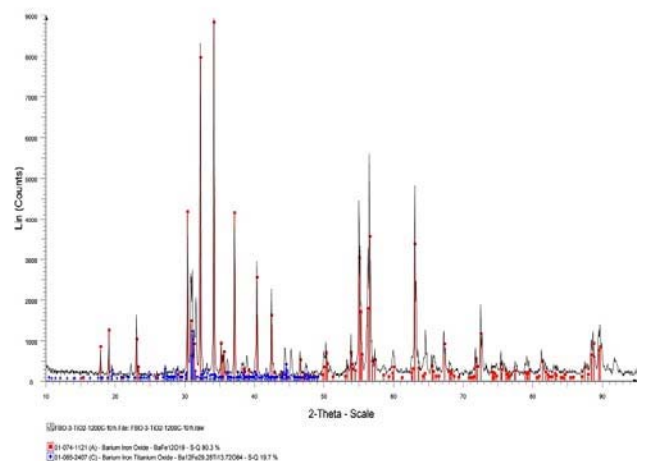
Za sinterovane na  $t = 1200$  °C u toku 2 h presovani su uzorci praha aktiviranog 220 min. i 10 h. Rendgenogrami ovih uzoraka prikazani su na slici 4 i slici 5.



Slika 4 - Rendgenogram sinterovanog uzorak dobijenog presovanjem praha aktiviranog 220 min.

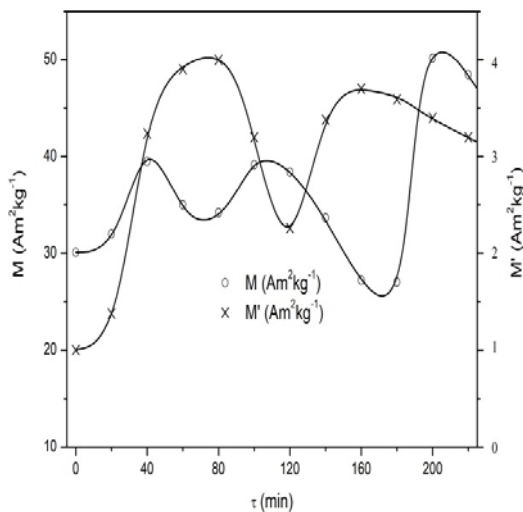
Mlevenjem praha u toku 220 min dobijene su dovoljno sitne čestice što obezbeđuje veliku kontaktnu površinu između čestica BaTiO<sub>3</sub> i čestica koje sadrže gvožđe i okside gvožđa. To obezbeđuje brzo formiranje nanokristala BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> u toku 2 h na 1200 °C 97,2% i 2,8%TiO<sub>2</sub>.

Rendgenogram sinterovanog uzorka dobijenog presovanjem praha aktiviranog u toku 10 h prikazan je na slici 5.



Slika 5 - Rendgenogram sinterovanog uzorak dobijenog presovanjem praha mlevenog 10 h.

Na rendgenogramu ovog uzorka za različite kristalne ravnj jasno su izraženi intenziteti pikova za  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  80,3%. Zbog još veće kontaktne površine među česticama uzorka aktiviranog 10 h formira se 19,7% masenih procenata faze  $\text{Ba}_{12}\text{Fe}_{29,28}\text{Ti}_{13,72}$ . Na difraktogramu slika 5 nisu izraženi pikovi ove faze što ukazuje da je ovaj oksid titana najverovatnije u amorfnom stanju. Sinterovani uzorci dobijeni od prahova mlevenih manje od 220 min imaju male intenzitete pikova. Kod ovih uzoraka zbog male kontaktne površine između relativno krupnijih čestica vreme sinterovanja od 2 h na 1200 °C nije dovoljno da se do kraja odvije reakcija formiranja  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  a pogotovu i oksida titana  $\text{Ba}_{12}\text{Fe}_{29,28}\text{Ti}_{13,72}$ . Magnetna svojstva prahova ispitivana su mlevenjem zavisnosti magnetizacije a) presovanih i b) presovanih pa sinterovanih prahova u zavisnosti od vremena mlevenja i temperature. Na slici 6 prikazana je zavisnost magnetizacije a) presovanih i b) presovanih i sinterovanih uzoraka.



Slika 6 - Zavisnost magnetizacije od vremena aktivacije presovanih uzoraka: a) -o- pre sinterovanja; b) -x- posle sinterovanja.

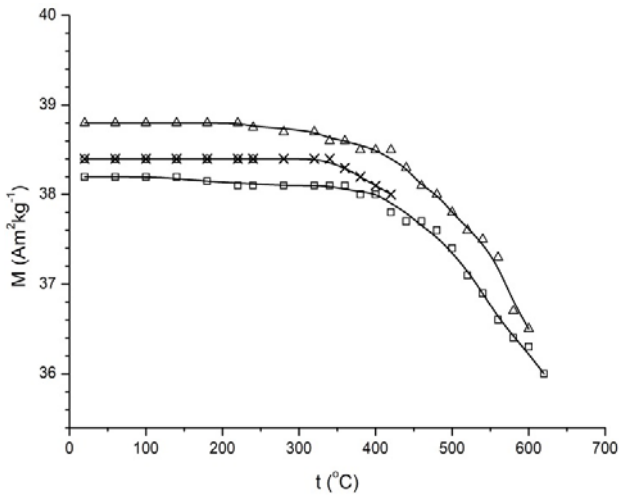
Prikazani dijagrami pokazuju da najveću magnetizaciju pre sinterovanja kriva a) ima za uzorak koji je mleven 200 min. Strukturne promene praha tokom mlevenja uzrokuju promene magnetnih svojstava. Smanjenje dimenzija nanokristala uzrokuje povećanje magnetizacije. Istovremeno, povećanje gustine haotično raspoređenih dislokacija i porast unutrašnjih mikronaprezanja uzrokuje smanjenje

magnetizacije. Na smanjenje magnetizacije utiče smanjenje udela metalnog gvožđa i formiranje njegovih oksida. Analizom krive a) na slici 2 može se zaključiti da se vremenski interval mlevenja od 0 do 22 min može podeliti na 5 pointervalu. U prvom pod intervalu od 0 do 40 min dominantan uticaj na magnetizaciju ima usitnjavanje kristala gvožđa i magnetizacija uzorka raste. U drugom vremenskom intervalu ode 40 do 80 min na pad magnetizacije utiče formiranje  $\text{FeO}$  koje nije magnetično i porast gustine defekata u prahu. U trećem vremenskom intervalu od 80 do 120 min porast magnetizacije uzrokovan je daljim usitnjavanjem kristala i porast procenata  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na račun oksida  $\text{FeO}$  i verovatno delimičnom anihilacijom defekata u prahu. U četvrtom vremenskom podintervalu pad magnetizacije uzrokovan je ponovnim generisanjem defekata i dalje formiranje oksida gvožđa  $\text{FeO}$ . U petom vremenskom podintervalu od 180 do 200 min u prahu ponovo dolazi do anihilacije defekata, daljeg usitnjavanja nanokristala i prelaza nemagnetičnog oksida  $\text{FeO}$  u magnetične okside  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Za ispitivanje uticaja odgrevanja na magnetna svojstva presovanih uzoraka odabran je uzorak dobijen od praha aktiviranog 120 min. Ovaj uzorak je zagrevan uz simultano merenje magnetizacije, brzinom 20 °Cmin<sup>-1</sup> do određene temperature  $t_{\text{max}}$ . Na maksimalnoj temperaturi uzorak je zadržan 15 min. Nakon hlađenja do sobne temperature isti uzorak je još četiri puta ponovo odgrevan svaki naredni put na višoj temperaturi.

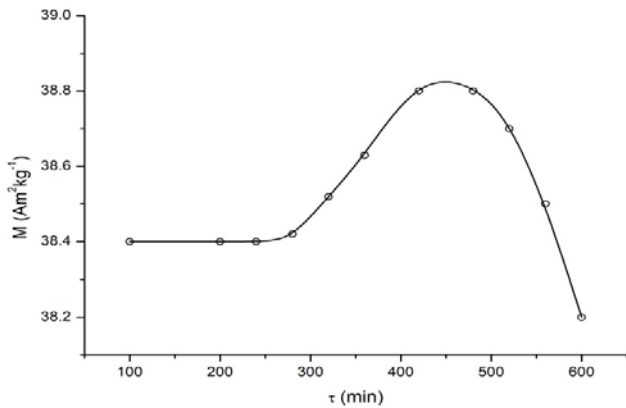
Zavisnost magnetizacije, tokom višestrukih zagrevanja istog uzorka od temperature, prikazane su na slici 7. Jačina primenjenog magnetnog polja pri svim merenjima iznosila je  $H = 50 \text{ kAm}^{-1}$ .





Slika 7 - Zavisnost magnetizacije od temperature tokom sukcesivnih zagrevanja istog uzorka: a) -o- do 240 °C; b) -x- do 420 °C; c) -Δ- 600 °C; d) -□- do 620 °C.

Zavisnost magnetizacije ohlađenog uzorka nakon svakog odgrevanja, prikazana je na slici 8.



Slika 8 - Zavisnost magnetizacije na  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presovanog uzorka dobijenog od praha aktiviranog 120 min, od temperature odgrevanja u toku 10 min.

Analizom rezultata prikazanih na slikama 7 i 8 može se zaključiti da se odgrevanjem uzorka na temperaturama nižim od 240 °C u uzorku ne dešavaju strukturne promene koje utiču na magnetna svojstva.

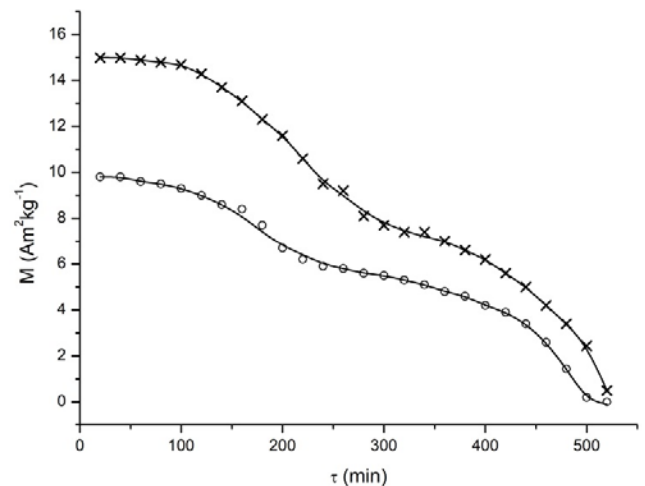
Nakon drugog odgrevanja na  $t = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$  magnetizacija ohlađenog uzorka se povećava za 1,4%. Povećanje magnetizacije posle ovog odgrevanja uzrokovano je procesom strukturne relaksacije. Tokom zagrevanja i odgrevanja na  $t = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$  pod uticajem toplotnog dejstva dolazi do finih međuatomskih pomeranja i anihilacije defekata generisanih tokom mlevenja i presovanja praha. Relaksiranu strukturu

karakteriše manja gustina haotično raspoređenih dislokacija i manja unutrašnja mikronaprezanja. Time je obezbeđeno lakše usmeravanje magnetnih domena u primenjenom magnetnom polju, veću pokretljivost zidova magnetnih domena i njihovo širenje. Porast magnetizacije u ovom temperaturnom intervalu uzrokovao je i postepenim prelazom oksida  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  u nanokristalni  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Tokom zagrevanja uzorka u temperaturnom intervalu od 420 °C do 600 °C magnetizacija opada. Pod dejstvom toplotne energije formiraju se veća kristalna zrna a magnetni domeni usmereni na nižim temperaturama delimično sa porastom temperature sve više prelaze u haotično stanje.

Pad magnetizacije ohlađenog uzorka nakon odgrevanja na  $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  u odnosu na magnetizaciju pre odgrevanja, za oko 0,5% uzrokovano je nastankom većih kristalnih zrna.

Uticaj dejstva toplotne energije u primenjenom magnetnom polju na magnetna svojstva sinterovanih uzoraka ispitivani su merenjem zavisnosti magnetizacije od temperature.

Na slici 9 prikazana je temperaturna zavisnost magnetizacije uzorka dobijenog presovanjem praha aktiviranog 200 min pa sinterovanog na temperaturi  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  u toku 2h.



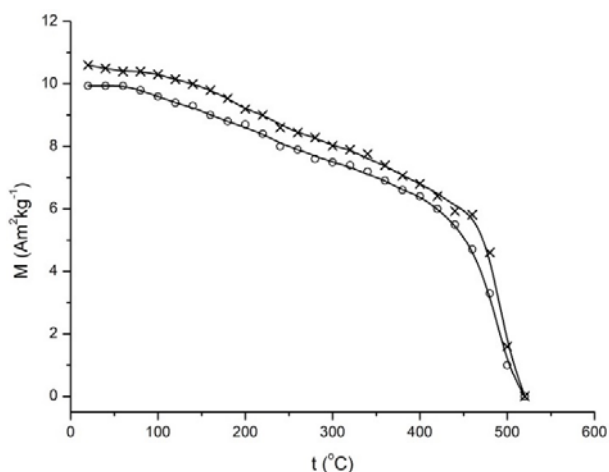
Slika 9 - Zavisnost magnetizacije od temperature uzorka dobijenog presovanjem praha mlevenog 200 min pa sinterovanog 2h na 1200 °C: a) -o- prvo zagrevanje; b) -x- drugo zagrevanje posle hlađenja uzorka u primenjenom magnetnom polju jačine  $H = 50\text{ kAm}^{-1}$ .

Tokom prvog zagrevanja magnetizacija opada u celom temperaturnom intervalu od 20 °C do 500 °C. Sa porastom temperature dejstvo toplotne energije na magnetne domene se povećava pa njihova usmerenost u primenjenom magnetnom polju opada. Nagli pad magnetizacije iznad temperature  $t = 460$  °C uzrokovan je blizinom Kiri temperature  $t_k = 500$  °C.

Nakon hlađenja uzorka zagrevanog do Kiri temperature u primenjenom magnetnom polju jačine  $H = 50$  kAm<sup>-1</sup> magnetizacija uzorka na  $t = 20$  °C je veća za oko 53% od magnetizacije uzorka pre prvog zagrevanja. Tokom hlađenja uzorka u primenjenom magnetnom polju na usmeravanje magnetnih domena pored magnetnog polja utiče i toplotna energija.

U zagrejanom uzorku do Kiri temperature magnetni domeni nisu više u položaju minimuma potencijalne energije pa su znatno pokretljiviji. Tako pokretne magnetne domene primenjeno magnetno polje tokom hlađenja bolje usmerava i na taj način magnetizacija ohlađenog uzorka se povećava.

Nakon hlađenja uzorka zagrejanog do Kiri temperature bez prisustva magnetnog polja magnetizacija uzorka na  $t = 20$  °C je ista kao pre prvog zagrevanja. Na slici 10 prikazana je temperaturna zavisnost magnetizacije sinterovanog uzorka dobijenog presovanjem praha u polju indukcije  $B = 0,5$  T. Prah je aktiviran 10 h.



Slika 10 - Zavisnost magnetizacije od temperature uzorka praha mlevenog 10 h presovanog u magnetnom polju  $B = 0,85$  T pa sinterovanog na 1200 °C u toku 2 h: -o- prvo zagrevanje; b) -x- drugo zagrevanje posle hlađenja uzorka u primenjenom magnetnom polju jačine  $H = 50$  kAm<sup>-1</sup>.

Zavisnost magnetizacije od temperature za ovaj uzorak sa slike 10 je slična kao i za uzorak sa slike 9. Nakon hlađenja uzorka u primenjenom magnetnom polju jačine  $H = 50$  kAm<sup>-1</sup> njegova magnetizacija na 20 °C je za oko 6,6% veća od njegove magnetizacije pre prvog zagrevanja. Malo povećanje magnetizacije nakon hlađenja u primenjenom magnetnom polju uzrokovano je presovanjem praha u magnetnom polju. Magnetna sila u magnetnom polju indukcije  $B = 0,85$ T je okrenula heksagonalna zrna u pravcu anizotropije pri presovanju. Nakon sinterovanja dobijen je polikristalni orijentisani tj. anisotropni uzorak. Zbog toga je domenska struktura ovog uzorka termički stabilnija a efekat toplotnog dejstva na usmeravanje domena tokom hlađenja u magnetnom polju mali.

#### 4 ZAKLJUČAK

Pokazano je da parametri sinteze polaznog praha 50.0 wt% Fe, 47.0 wt% BaTiO<sub>3</sub>, 3.0 wt% TiO<sub>2</sub> dominantno utiču na svojstva sinterovanih uzorka.

Metodom XRD analize pokazano je da sa porastom vremena aktivacije u vazdušnoj atmosferi dolazi do promene hemijskog sastava smeše, smanjenja srednjih dimenzija kristala i povećanja gustine defekata i unutrašnjih mikronaprezanja u prahu. Ove promene utiču na magnetna svojstva presovanih uzoraka pre i posle sinterovanja. Pokazano je da se tokom zagrevanja i izotermiskih odgrevanja u presovanim uzorcima praha odigrava proces strukturne relaksacije. Višestrukim odgrevanjem istog uzorka, pokazano je da se proces strukturne relaksacije odigrava u temperaturnom intervalu od 240 °C do 450 °C.

XRD analizom sinterovanih uzoraka utvrđeno je da vreme mlevenja polaznog praha kraće od 200 min nije dovoljno da se sinterovanjem presovanih uzoraka praha na temperaturi 1200°C u toku 2h u potpunosti završi reakcija formiranja barijumheksaferita BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>.

Uzorak polaznog praha aktiviranog 10h presovan je van primenjenog magnetnog polja i u primenjenom magnetnom polju indukcije  $B = 0,85$  T. Pokazano je da uzorci presovani u primenjenom magnetnom polju posle sinterovanja imaju magnetizaciju veću za oko 10 % u

odnosu na iste uzorke koji nisu presovani u primjenom magnetnom polju.

## 5 LITERATURA

- [1] A. S. N., J. Onattu, and T. A.K, "Multiferroic Materials," in *Functional Materials*, 2012.
- [2] R. M. Thankachan and R. Balakrishnan, "Synthesis Strategies of Single-Phase and Composite Multiferroic Nanostructures," in *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, 2018.
- [3] M. Gich and Z. Ma, "Multiferroic oxide thin films," in *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*, 2018.
- [4] A. J. C. Buurma, G. R. Blake, T. T. M. Palstra, and U. Adem, "Multiferroic Materials: Physics and Properties," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [5] V. V. Soman, V. M. Nanoti, and D. K. Kulkarni, "Dielectric and magnetic properties of Mg-Ti substituted barium hexaferrite," *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 5, pp. 5713–5723, 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.12.089.
- [6] K. S. Martirosyan, E. Galstyan, S. M. Hossain, Y. J. Wang, and D. Litvinov, "Barium hexaferrite nanoparticles: Synthesis and magnetic properties," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 176, no. 1, pp. 8–13, 2011, doi: 10.1016/j.mseb.2010.08.005.
- [7] D. Kosanović et al., "Influence of mechanical activation on functional properties of barium hexaferrite ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 6, pp. 6666–6672, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.01.078.
- [8] W. S. Castro, R. R. Corrêa, P. I. P. Filho, J. M. R. Mercury, and A. A. Cabral, "Dielectric and magnetic characterization of Barium hexaferrite ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 1, pp. 241–246, 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.08.064.
- [9] V. Pillai, P. Kumar, and D. O. Shah, "Magnetic properties of barium ferrite synthesized using a microemulsion mediated process," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 116, no. 3, 1992, doi: 10.1016/0304-8853(92)90105-W.
- [10] Z. Ristanović, A. Kalezić – Glišović, N. Mitrović, S. Đukić, D. Kosanović, and A. Maričić, "The influence of mechanochemical activation and thermal treatment on magnetic properties of the BaTiO<sub>3</sub>-FexOy powder mixture," *Sci. Sinter.*, vol. 47, no. 1, pp. 3–14, 2015, doi: 10.2298/SOS141121001R.
- [11] X. Zhang, Z. Yue, and Y. Zhang, "Structure characterization and magnetic properties of barium hexaferrite films deposited on 6H-SiC with random in-plane orientation," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 12, pp. 8611–8615, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.03.169.
- [12] A. Rani, J. Kolte, S. S. Vadla, and P. Gopalan, "Structural, electrical, magnetic and magnetoelectric properties of Fe doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 7, pp. 8010–8016, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.01.205.
- [13] S. Rajan, P. M. M. Gazzali, and G. Chandrasekaran, "Electrical and magnetic phase transition studies of Fe and Mn co-doped BaTiO<sub>3</sub>," *J. Alloys Compd.*, vol. 656, pp. 98–109, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.09.199.
- [14] K. Samuvel and K. Ramachandran, "Structure, electrical and magnetic property investigations on Fe-doped hexagonal BaTiO<sub>3</sub>," *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 4, pp. 1781–1786, 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.240.
- [15] F. M. Silva Júnior and C. W. A. Paschoal, "Spin-phonon coupling in BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> M-type hexaferrite," *J. Appl. Phys.*, vol. 116, no. 24, p. 244110, 2014, doi: 10.1063/1.4904062.
- [16] D. Kosanović et al., "The influence of mechanical activation on the morphological changes of Fe/BaTiO<sub>3</sub> powder," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 212, pp. 89–95, 2016, doi: 10.1016/j.mseb.2016.07.016.
- [17] R. Arbain, M. Othman, and S. Palaniandy, "Preparation of iron oxide nanoparticles by mechanical milling," *Miner. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–9, 2011, doi: 10.1016/j.mineng.2010.08.025.
- [18] S. Bid and S. K. Pradhan, "Preparation of zinc ferrite by high-energy ball-milling and microstructure characterization by Rietveld's analysis," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 82, no. 1, pp. 27–37, 2003, doi: 10.1016/S0254-0584(03)00169-X.
- [19] C. Suryanarayana, E. Ivanov, and V. V. Boldyrev, "The science and technology of mechanical alloying," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 304–306, no. 1–2, pp. 151–158, 2001, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01465-9.
- [20] A. C. Lima, N. Pereira, P. Martins, and S. Lanceros-Mendez, "Magnetic materials for magnetoelectric coupling: An unexpected journey," in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 29, 2020.
- [21] H. Zhao et al., "Aurivillius layer-structured multiferroic materials," in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications*, 2019.



## Cavitation Effect Indicators on Kaplan Turbines

### Pokazatelji dejstva kavitacije na Kaplan turbinama

G. Orašanin<sup>1\*</sup>, S. Simić<sup>1</sup>, S. Šijaković<sup>1</sup>, J. Blagojević<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

**Abstract:** During the exploitation of hydropower plants, there are various impacts that negatively affect their efficacy. One of the biggest problems that occurs during the operation of these plants is the appearance of cavitation on the turbine blades. The impact of cavitation on the technical performances of the hydropower plant is unfavorable, and the goal is to minimize its impact, i.e. reduce it to an acceptable level. The paper presents the impact of cavitation on reaction turbines in Višegrad Hydro Power Plant (Višegrad HPP). The cavitation and abrasive effects on vertical Kaplan turbines were investigated. During testing, NDT testing (non-destructive testing) methods were used. Based on the obtained results of the damage test of Kaplan turbines, it can be concluded that these turbines are significantly exposed to the effect of cavitation, as well as damage due to the effect of sand and other sediments in the water. It is necessary to carry out further research in terms of preventive measures in order to achieve optimal functioning of these hydro turbines.

**Keywords:** cavitation, impact, indicators, Kaplan turbines

**Apstrakt:** Prilikom eksploatacije hidroenergetskih postrojenja dolazi do različitih uticaja koji se negativno održavaju na njihov efikasan rad. Jedan od najvećih problema koji se javlja u toku rada ovih postrojenja je pojava kavitacije na lopaticama turbine. Uticaj kavitacije na tehničke performanse hidroenergetskog postrojenja je nepovoljan i cilj je da se njen uticaj minimizira odnosno svede na prihvatljiv nivo. U radu je prezentovan uticaj kavitacije na reakcione turbine u Hidroelektrani Višegrad (HE Višegrad). Vršeno je ispitivanje dejstva kavitacije i abrazivnog dejstva na vertikalne Kaplan turbine. Prilikom ispitivanja korišćene su metode „NDT ispitivanja“ (non – destructive testing). Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja oštećenja Kaplan turbina može se zaključiti da su ove turbine u značajnoj mjeri izložene dejstvu kavitacije, kao i oštećenjima usljed dejstva pijeska i drugih sedimenata koji se nalaze u vodi. Neophodno je provoditi dalja istraživanja u pogledu preventivnih mjera u cilju postizanja optimalnog rada ovih hidroturbina.

**Ključne riječi:** kavitacija, uticaji, pokazatelji, Kaplan turbine

## 1 UVOD

Hidroenergija je jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije, a ujedno i jedini koji je ekonomski konkurentan energiji dobijenoj iz fosilnih goriva i nuklearnoj energiji. Za iskorišćenje potencijala energije vode koriste se hidroelektrane različitih konstrukcija. To su energetska postrojenja koja energiju vode pretvaraju u električnu energiju. Energija vode je energija pritiska, energija položaja i kinetička energija. Navedene

energije se preko hidraulične turbine pretvaraju u mehaničku energiju obrtnog kretanja koju generator pretvara u električnu energiju te je putem razvoda šalje u sistem snabdijevanja [1]. Postoje različite konstrukcije hidrauličnih turbina, a najčešće su u primjeni Kaplanova, Fransisova i Peltonova turbina.

Upravljanje hidroelektranama u toku njihovog rada predstavlja važan faktor za postizanje veće efikasnosti hidroturbina. Nakon nekoliko godina rada turbine

\*goranorasanin@yahoo.com

pokazuju smanjene performanse jer se iz različitih razloga ozbiljno oštećuju [3]. Glavni uzroci oštećenja hidroturbina su problemi vezani sa kavitacijom, erozijom, mehaničkim oštećenjima, zamorom materijala, i dr. Kavitacija predstavlja najveći problem koji negativno utiče na performanse turbina, a ujedno može izazvati njihova velika oštećenja.

U radu su prezentovani rezultati ispitivanja dejstva kavitacije i abrazivnog habanja Kaplan turbine.

## 2 NASTAJANJE I NEGATIVNI EFEKTI KAVITACIJE KOD HIDRAULIČNIH TURBINA

Kavitacija je veoma važan hidrodinamički fenomen koji se javlja u mnogim oblastima povezanim sa transportom tečnosti. Kavitacija se može umanjiti, ali se ne može do kraja izbjeći [1]. Poznato je da hidraulične mašine najčešće trpe jake vibracije, buku, materijalnu štetu i dr. zbog kavitacije. Kavitacija je veoma štetna za hidrauličnu mašinu i njen sistem jer narušava kvalitet rada i životni vijek postrojenja [5].

Većina rijeka sadrži visoke koncentracije sedimenata. Visoka koncentracija sedimenata dovodi do ozbiljnog habanja turbina koje rade u tim uslovima. Singh i ostali 2012 [6] navodi da je jedan od glavnih uzroka materijalnog oštećenja turbina visoko prisustvo pijeska (posebno kvarca) i mulja u dovodnom cjevovodu turbine, te da u većini praktičnih slučajeva kavitacionu eroziju potpomažu čvrste čestice prisutne u tečnom mediju. Lian i ostali 2018 [4], Wang i ostali 2018 [10] eksperimentalnim istraživanjem pokazuju i da se oštećenja povećavaju sa povećanjem veličine sedimenata. Zajedničkim djelovanjem kavitacije i habanja materijala pijeskom može doći do ozbiljne abrazije i smanjenja hidrauličnih performansi turbine. Funkcionalnost hidraulične turbine je na taj način u velikoj mjeri ugrožena. Kavitacija je po pravilu karakteristična za čist tok vode, dok je habanje specifično za oštećenje pijeskom, a abrazija se odnosi na oštećenje usljed zajedničkog dejstva kavitacije i habanja [11]. Rezultat zajedničkog djelovanja kavitacije i habanja prouzrokuje veću eroziju, u odnosu na ukupnu eroziju nastalu usljed dejstva sedimenata i tečnosti [6].

Kavitacija najčešće ima negativne posljedice kao što su: smanjenje efikasnosti hidraulične mašine, povećanje buke i vibracija. Isto tako, može uzrokovati oštećenja tokom implozije kavitacionih mjehurova kada dolazi do oštećenja materijala tzv. pitting (kavitacijska erozija). Erozijska oštećenja tokom rada mašina mogu uzrokovati nastanak pukotina što povećala troškove održavanja i rekonstrukcije turbinske opreme [9] što znači da je njihova blagovremena sanacija nužna.

Koliko brzo će se materijal razarati zavisi od više faktora. Između ostalog zavisi od veličine kavitacionih mjehurova, veličine i količine sedimenata u vodi, karakteristika materijala od kojih je napravljena turbina, ali i od uslova rada hidrauličnog postrojenja.

## 3 ANALIZA RADA I ISPITIVANJE KAPLAN TURBINA NA UTICAJ KAVITACIJE

Prosječna godišnja proizvodnja u Hidroelektrani Višegrad (HE Višegrad) u posljednjih 20 godina iznosi oko 976 GWh električne energije. Instalirana snaga ove hidroelektrane od 3 x 105 MW ostvaruje se pomoću vertikalnih Kaplan turbina. Pouzdanost i sigurnost u radu, a samim tim i efikasnost ovog postrojenja je od velikog značaja.

Da bi se imao jasan uvid u uslove pri kojima rade turbine prezentovani su i određeni tehnički parametri procesa. U tabeli 1 prikazane su minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti dotoka i protoka kroz Kaplan turbine u toku 2021. godine.

Tabela 1. Protoci kroz turbine ( $m^3/s$ )

Dotok		
Min	Max	Prosjeak
38	1722	352
Protok		
Max	Prosjeak	
1786	352	
Kroz turbine		
Max	Prosjeak	
767	335	

U tabeli 2 je prikazano vrijeme rada agregata, broj njihovog pokretanja i proizvodnja električne energije u 2021. godini za svaki agregat. Iz tabele 2 se može vidjeti da su potrebe za proizvodnjom električne energije

zahtijevale i određen broj pokretanja agregata. U 2021. godini bilo je ukupno 754 pokretanja sva tri agregata. Agregat 1 (AG1) najviše puta je pokrenut (282 puta), a agregat 3 (AG3) najmanje (227 puta). Agregat 2 (AG2) u toku godine je pokrenut 245 puta.

Tabela 2. Vrijeme rada agregata, broj pokretanja agregata i proizvedena električna energija

	Vrijeme rada agregata (h)	Broj pokretanja agregata	Godišnja proizvodnja (MWh)
AG1	4.470,41	282	387.386,1
AG2	5.075,02	245	438.890,37
AG3	4.089,02	227	357.587,73
Ukupno	13.643,45	754	1183.864,2

Kada se analizira rad agregata, broj pokretanja i godišnja proizvodnja električne energije može se zaključiti da broj pokretanja agregata nije nužno jednak satima rada pojedinačnih agregata. Naime, agregat AG2 je pokrenut 245 puta, odnosno 37 puta manje od agregata AG1, ali je AG2 u radu proveo 604,61 h više i proizveo je 51.504,27 MWh više električne energije od agregata AG1.

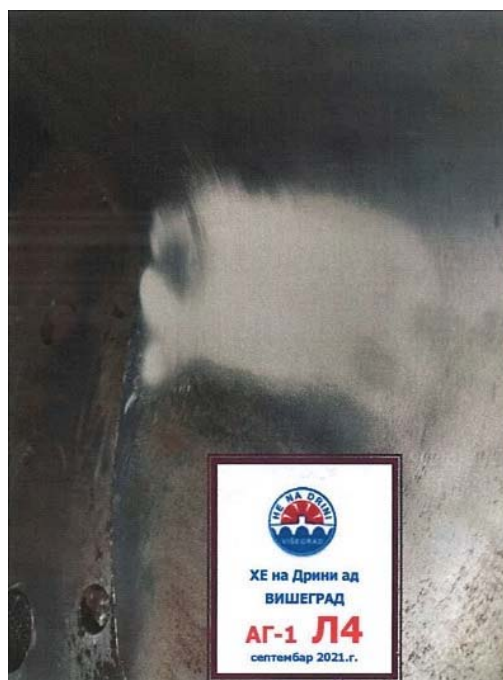
Ispitivanja Kaplan turbina na uticaj kavitacije u HE Višegrad su vršena u avgustu 2021. godine. Prilikom ispitivanja korišćene su sljedeće metode „NDT ispitivanja“ (non – destructive testing) [8]:

- vizuelno ispitivanje radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- ispitivanje metodom magnetnih čestica radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje, iz revizionog otvora, antikavitacione letve radnih kola turbine AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje obloge radnih kola turbine AG1, AG2 i AG3;
- vizuelno ispitivanje lopatica usmjernog aparata agregata AG1, AG2 i AG3.

#### 4 REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola prvog agregata (AG1) ustanovljena su oštećenja na leđnoj strani, na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatice u

vidu matiranih površina, zatim oštećenja na spoljašnjoj obodnoj ivici na antikavitacionoj letvi. Ustanovljena su mehanička oštećenja na grudnoj strani, na spoljašnjoj obodnoj ivici u obliku riseva. Ispitivanjem magnetnim česticama u zoni 300 mm od ivica lopatica i prelaznih radijusa tijela i rukavca lopatica nisu se pokazale indikacije tipa prslina. Na slici 1 prikazana su oštećenja na lopatici 4 (L4) i lopatici 2 (L2) radnog kola agregata AG1 (Slika 2).



Slika 1 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatice



Slika 2 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na spoljašnjoj obodnoj ivici na antikavitacionoj letvi



Slika 3 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola drugog agregata (AG2) ustanovljena su oštećenja na leđnoj strani i na izlaznim ivicama lopatica. Na šest lopatica su ustanovljena oštećenja na prelaznom radijusu tijela i rukavca lopatica. Takođe, na antikavitacionoj letvi su ustanovljena oštećenja na leđnoj strani i na spoljašnjoj obodnoj ivici. Ispitivanjem magnetnim česticama u zoni 300 mm od ivica lopatica i prelaznih radijusa tijela i rukavca lopatica nisu se pokazale indikacije tipa prslina. Na slici 3 prikazana su oštećenja na lopatici 2 (L2) i lopatici 4 (L4) radnog kola agregata AG2.

Prilikom pregleda i ispitivanja radnog kola trećeg agregata (AG 3) ustanovljena su oštećenja izlaznih ivica lopatica, na dijelovima čeonu površine izlazne ivice lopatice i leđne površine u zoni izlazne ivice. Oštećenja kavitacione letve su ustanovljena na pet lopatica u zoni ka izlaznoj ivici. Mehanička oštećenja su ustanovljena na skoro svim lopaticama u vidu zareza, ogrebotina, i udubljenja. Ispitivanjem magnetnim česticama uočeno je oštećenje na dijelu antikavitacione letve kod otvora za montažu i demontažu lopatice, oštećenje na središnjem dijelu lopatice i oštećenje na izlaznoj ivici u vidu matirane površine. Na slici 4 prikazana su oštećenja na lopatici 4 (L4) i lopatici 7 (L7) radnog kola agregata AG3 (Slika 5).



Slika 4 - Kavitaciono oštećenje na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice



Slika 5 - Kavitaciono oštećenje na dijelu antikavitacione letve kod otvora za montažu i demontažu lopatice

Rezultati ispitivanja oštećenja Kaplan turbina pokazuju da su iste izložene kavitacionom oštećenju.

Ispitivanja su pokazala da su u vidu matirane površine najčešće javljaju oštećenja na leđnoj strani, na izlaznoj ivici lopatice, na prelaznim radijusima tijela i rukavca lopatice. Dimenzije površina koje obuhvataju kavitaciona oštećenja su približno 800 mm<sup>2</sup>, sa maksimalnom dubinom od 1 mm.

Oštećenja koja su ustanovljena u vidu zarez, riseva, ogrebotina i udubljenja na skoro svim lopaticama su mehanička oštećenja i naročito su izražena na ulaznim ivicama lopatica. Ova oštećenja najčešće su posljedica sedimenata, odnosno čvrstih čestica koji se nalaze u vodi. Oštećenja postaju izraženija sa povećanjem koncentracije pijeska i većim prečnicima čestica što prouzrokuje značajno smanjenje efikasnosti hidroenergetskog postrojenja.

Za ublažavanje i prevenciju habanja turbina kao posljedice kavitacione erozije u literaturi se mogu pronaći različiti pristupi. Svakako kao prva mjera prevencije dejstva sedimenata na hidrauličnu turbinu je sprečavanje ulaska sedimenata (pijeska, mulja) u dovodni vod turbine. Ako su uslovi za sprečavanje ulaska sedimenata otežani, kao mjera bi se mogla sprovesti površinska zaštita turbina od dejstva sedimenata u vodi. Površinska zaštita se odnosi na prevlake koje se mogu nanijeti na postojeće turbine i na taj način djelovati preventivno. Postoje razne vrste materijala koji se mogu koristiti kao prevencija u zaštiti i od kavitacije kao i od habanja turbina prouzrokovanim dejstvom sedimenata.

Pošto oštećenja od dejstva kavitacije i habanja materijala, odnosno razaranja materijala zavise od niza faktora, između ostalog vrste i starosti materijala, količine sedimenata veličine kavitacionog mjehura i frekvencije pojave kavitacije jedan od uslova povećanja kavitacije su i uslovi rada hidroagregata. Ukoliko se često mijenjaju režimi rada, odnosno ako dolazi do naglih promjena u sistemu rada, izraženija je i pojava kavitacije.

## 5 ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja oštećenja Kaplan turbina može se zaključiti da su turbine u HE Višegrad u značajnoj mjeri izložene dejstvu kavitacije,

kao i oštećenjima usljed dejstva pijeska, odnosno sedimenata koji se nalaze u vodi. Tokom provedenih ispitivanja identifikovana su oštećenja turbina i ustanovljeno da je sinergijski efekat erozije pijeska i kavitacije izraženiji od njihovih pojedinačnih efekata. Dobijeni rezultati mogu biti veoma korisni u nastojanju da se smanji uticaj kavitacije, habanje lopatica turbina i oštećenje agregata uopšte.

Neophodno je naglasiti da je teško u potpunosti izbjeći kavitaciju u hidrauličnim turbinama, ali se definitivno može svesti na prihvatljiv nivo. Pored redovne i blagovremene sanacije oštećenja koja se pojavljuju na agregatima nužno je preuzeti i odgovarajuće preventivne mjere zaštite. Preventivnim dejstvom bi se ostvarilo poboljšanje efikasnosti ili iskoristivosti postrojenja, a uticalo bi se na nivo buke i vibracija koje bi se javljale u manjoj mjeri.

## 6 LITERATURA

- [1] Benišek, M. (1998) Hidraulične turbine, Mašinski fakultet, Beograd
- [2] HE Višegrad, <https://www.henadrini.com/>, pristupljeno: 25.11.2022. godine
- [3] Khurana S., Navtej, Singh H., Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.2, No.1, 2012.
- [4] Lian J., Gou W., Li H., Zhang H., Effect of sediment size on damage caused by cavitation erosion and abrasive wear in sediment-water mixture, Wear 398–399 (2018) 201–208, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.010>.
- [5] Luo X.W, Ji B., Tsujimoto Y., A Review of Cavitation in Hydraulic Machinery, Journal of Hydrodynamics, 2016,28(3):335-358, DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60638-8.
- [6] Singh R., S.K., Mishra S.K., Cavitation Erosion in Hydraulic Turbine Components and Mitigation by Coatings: Current Status and Future Needs, Journal of Materials Engineering and Performance (2012) 21:1539–1551, DOI: 10.1007/s11665-011-0051-9.
- [7] Singh V.K., Singal S.K., Operation of hydro power plants-a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69 (2017) 610–619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.169>
- [8] Šijaković S., (2022), Tehnički pokazatelj dejstva kavitacije na Kaplan turbinama u HE Višegrad, Master rad, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo.



- [9] Tianchen Y., A Review of the Research on the Influence of Cavitation and Abrasion on Hydroturbine Performance, E3S Web of Conferences 233, 03068 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123303068>
- [10] Wang Y., Wu J., Ma F., Cavitation–silt erosion in sand suspensions, Journal of Mechanical Science and Technology 32 (12) (2018) 5697~5702, DOI 10.1007/s12206-018-1116-6
- [11] Weili L., Jinling L., Xingqi L., Yuan L., Research on the cavitation characteristic of Kaplan turbine under sediment flow condition, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12 (2010) 012022, doi:10.1088/1755-1315/12/1/012022.



## Application of Additive Manufacturing in Market Communication

### Primjena aditivne proizvodnje u tržišnoj komunikaciji

M. Miljanović<sup>1</sup>, M. Milićević<sup>1\*</sup>, A. Koprivica<sup>1</sup>, S. Dostinić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Stepe Stepanovića bb

**Abstract:** Additive manufacturing (industrial 3D printing) is a technology that provides the opportunity for engineers to include their creativity and innovative thinking, due to the fact that this type of technology manages to produce complex geometries, unlike traditional manufacturing. The paper presents the course of implementation and the results of the project "Application of 3D modeling and design for prototypes in market communication", started in 2022. The purpose of the research is the creation of "digital" prototypes using 3D modeling that will be used in advertising, in the association of the scientific research community with the economy. The use of additive manufacturing in advertising makes it possible to offer the consumer a tangible object as the model displaying product characteristics. As the final result of the project, in the FabLab laboratory of the Faculty of Production and Management Trebinje, prototypes of conceptual solutions of microphones (radio symbol) and prototypes of textbooks with a graduation cap (higher education symbols) were created, which were designed using the Solidworks software tool.

**Keywords:** additive manufacturing, 3D modeling, prototyping, market communication

**Apstrakt:** Aditivna proizvodnja (industrijska 3D štampa) je tehnologija koja pruža mogućnost inženjerima da uključuju svoju kreativnost i inovativno razmišljanje, s obzirom da ova vrsta tehnologija uspijeva proizvesti složene geometrije, za razliku od tradicionalne proizvodnje. U radu je prikazan tok provođenja i rezultati projekta "Primjena 3D modeliranja i dizajna za izradu prototipova u tržišnoj komunikaciji", započetog 2022. godine. Svrha istraživanja jeste izrada „digitalnih“ prototipova primjenom 3D modeliranja koji će se primjenjivati u oglašavanju, u zajedničkoj saradnji naučnoistraživačke zajednice i privrede. Inovacije i doza kreativnosti danas igraju glavnu ulogu u osvajanju tržišnih segmenata u svim područjima poslovanja. Korištenje aditivne proizvodnje u oglašavanju omogućava približavanje potrošaču na način da dobiju jasniju predstavu o karakteristikama proizvoda u modelu. Kao konačan rezultat projekta, u laboratoriji FabLab Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje, izrađeni su prototipovi idejnih rješenja mikrofona (simbola radija) i prototipa udžbenika sa diplomskom kapom (simbola za visoko obrazovanje), a koji su projektovani primjenom softverskog alata Solidworks-a.

**Ključne riječi:** aditivna proizvodnja, 3D modeliranje, izrada prototipova, tržišna komunikacija

## 1 UVOD

U vremenu kada tržište zahtijeva sve veći kvalitet proizvoda, fleksibilnost, manje troškove, kraće vrijeme razvoja i proizvodnje, maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju, aditivna proizvodnja dolazi do izražaja, te uspješno daje odgovore na sve postavljene zahtjeve.

Danas se pod pojmom aditivna proizvodnja podrazumjeva niz sličnih proizvodnih procesa kojima se

automatizovano, sukcesivnim nanošenjem i spajanjem slojeva gradivnog materijala na osnovu upravljačkih instrukcija kreiranih direktno iz CAD datoteka ili drugih digitalnih podataka bez korištenja alata, pribora, bez potrebe za dodatnim mašinskim operacijama, proizvode fizički objekti [1].

Istorijski gledano, postupci aditivne proizvodnje prošli su kroz nekoliko faza s obzirom na njihovu

\* marina.milicevic@fpm.ues.rs.ba

primjenu. U početku, primarno korištenje adaptivne proizvodnje je bilo za brzu izradu prototipova, pa su kao takvi najčešće korišteni za unapređivanje procesa razvoja proizvoda [2-3]. Pored primjene za izradu prototipa, aditivna proizvodnja se još koristi i pri razvoju i izradi alata i brzog proizvodnji [4].

Područje primjene aditivne proizvodnje vrlo je široko, od proizvoda široke namjene preko automobilske i avio industrije do arhitekture [2]. Ipak, pored svih prednosti nužno je naglasiti da aditivni procesi imaju i brojna ograničenja, zbog čega je prije uvođenja ovakvog pristupa proizvodnji potrebno izvršiti detaljnu procjenu za svaki pojedinačni slučaj implementacije.

Mogućnosti i potencijali koje pruža aditivna proizvodnja doveli su do razvoja niza različitih procesa aditivne proizvodnje kao što su: stereolitografija - SLA, selektivno lasersko sinterovanje - SLS, trodimenzionalno štampanje – 3DP, nanošenje materijala ekstrudiranjem – FDM, proizvodnja objekata laminiranjem – LOM.

Jedan od procesa aditivne proizvodnje koji je, zahvaljujući svojim karakteristikama, našao brojne aplikativne mogućnosti je proces zasnovan na patentiranoj 3D™ MIT tehnologiji pod nazivom trodimenzionalno štampanje, a prvi put se komercijalizuje 1997. godine. U suštini rad svih 3DP sistema zasniva se na hemijskom vezivanju adhezivnim tečnim sredstvima (binder) sukcesivno nanesenih slojeva praškastih građivnih materijala pri čemu se fizički objekti „štampaju“ direktno iz 3D CAD okruženja [1]. 3D štampači omogućavaju brz, jeftin i jednostavan razvoj kompleksnih modela, prototipova, ali i finalnih proizvoda od različitih materijala [5].

U radu je prikazan tok provođenja i rezultati projekta „Primjena 3D modeliranja i dizajna za izradu prototipova u tržišnoj komunikaciji“, započetog 2022. godine. Svrha istraživanje jeste izrada prototipova primjenom 3D modeliranja koji će se koristiti u oglašavanju. Ukazujući da je istraživanje realizovano putem zajedničke saradnje naučnoistraživačke zajednice i privrede (HP Media Group i FPM Trebinje) pristupilo

se izradi dva 3D modela na primjeru pomenutih institucija, odnosno primjerima na kojima je moguće prikazati na koji se način se može lako i efikasnije prenijeti marketinška poruka ciljnim grupama. Korištenje aditivne proizvodnje u oglašavanju omogućava približavanje potrošaču na način da jasnije dobiju predstavu o karakteristikama proizvoda u modelu. Metodologija koju ćemo koristiti u ovom istraživanju je Brainstorming (članovi projektnog tima osmišljavaju idejno rješenje za: (1) prototipove mikrofona – kao simbola radia i (2) udžbenika sa diplomskom kapom kao simbola za više obrazovanje). Primjenom softverskog alata za mašinsko projektovanje i automatizaciju procesa pomoću parametarskog modelovanja punih tijela - Solidworks-a, pristupiće se konstrukciji 3D modela u laboratoriji FabLab Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje.

## **2 KONSTRUISANJE TRODIMENZIONOG MODELA RAČUNARSKIM PROGRAMOM ZA MODELIRANJE SOLIDWORKS**

Konstruisanje trodimenzionalnog modela u nekom od za tu svrhu namjenjenih programa omogućava nam kreiranje modela koji imaju iste osobine kao stvarni predmeti. Trodimenzionalni model se može prikazati kao dvodimenzionalna (2D) slika, a takođe se može i fizički napraviti pomoću uređaja za 3D štampanje. Veoma značajna je i primjena 3D modeliranja u reverzibilnom inženjerstvu [6]. Naravno, CAD (eng. Computer Added Design) sistemi su značajni i sa aspekta modelovanja i simulacije mašinskih sklopova i procesa. Jedna takva primjena kompjuterski podržanog modelovanja na projektovanje brusnog točka za proizvodnju burgije data je u [7], gdje su autori razvili CAD modul sa grafičkim interfejsom za automatsko dizajniranje brusnog točka, a koji za ulazne parametre, između ostalog ima: prečnik burgije, ugao zavojnice, napadni ugao bušenja, ugao brusa i vertikalno rastojanje.

Danas dostupni čak i u cloud verziji, programi za konstruisanje nekad su bili privilegija vojne industrije. Tokom godina razne platforme za konstruisanje postale su dostupne inženjerima širom svijeta, a po svojim referencama i sa preko 2 miliona korisnika izdvojio se program SolidWorks.

Programi za 3D modeliranje i animaciju (pa tako i SolidWorks) podržavaju različite algoritme i metode pomoću kojih predstavljaju objekte u svom radnom prostoru. Jedna od najjednostavnijih metoda kreiranja 3D objekata u Solidworks-u je njihovo konstruisanje iz skupa linija koje predstavljaju ravne ivice 3D modela i koje određuju njegove geometrijske osobine. Ovaj model izgleda kao da je napravljen od žice, stoga i naziv žičani model. Takav metod je poznat kao žičani model jer izgleda kao da je objekat konstruisan od žice. Granična reprezentacija se odnosi na takav način modeliranja koji konstruiše 3D objekat iz opisa površina koje ga ograničavaju. Od tehnika za 3D modelovanje, najpoznatija je ekstrudiranje - automatsko konstruisanje granične reprezentacije istežanjem presječnog oblika duž njegove ose. Tehnika razvijene površine (revolviranje) pomaže nam da konstruišemo objekte tako što se 2D kontura rotira oko jedne od 3D osa da bi se dobila razvijena površina.

Savremeni pristup razvoju novog proizvoda je nezamisliv bez upotrebe softvera za CAD/CAM geometrijsko modelovanje. SolidWorks svojim korisnicima nudi veliki broj alatki i paleta za svaki od svoja tri radna okruženja (Part, Assembly, Drawings). Strukturno stablo (FeatureManager) je veoma važna paleta sa alatkama u SolidWorks-u koja omogućava pregled elemenata modela: pomoćne geometrije, skica, formi, dijelova sklopa, itd.

Bez obzira koji od softvera za CAD modelovanje se koristi, njihova upotreba dovela je velike promjene u tradicionalnom pristupu razvoja i konstruisanja novog proizvoda. Tako su, zajedno sa tehnologijom 3D štampe klasični prototipovi istisnuti iz upotrebe i zamjenjeni 3D modelima.

3D štampanje je tehnologija koja se sve više koristi u brzom izradi prototipova, zbog čega su istraživači sve više zainteresovani za tačnosti geometrijskih dimenzija odštampanih primjeraka.

### 3 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Proizvodi i usluge imaju kratak životni ciklus, veliku konkurenciju i lako se oponašaju, te je neophodan određen nivo inovativnosti u tržišnoj komunikaciji.

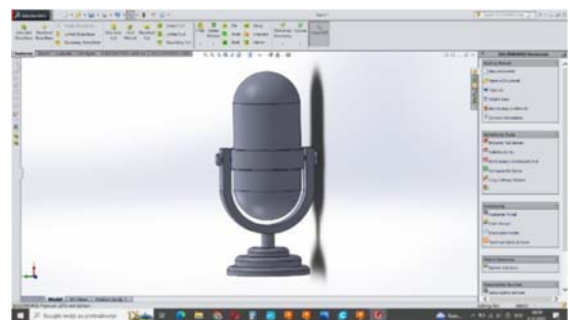
Oglašavanje je ključno za uspjeh poslovanja jer doseže do ciljne publike i uvjerava ih da traže određene proizvode/usluge.

Sve ovo upućuje na potrebu za inoviranjem u oglašavanju, a sve u cilju da do potrošača poruka stiže na zanimljiv i realističan način te da putem dobijenih informacija mogu objektivno uporediti konkurentske proizvode i odlučiti koji će proizvod koristiti.

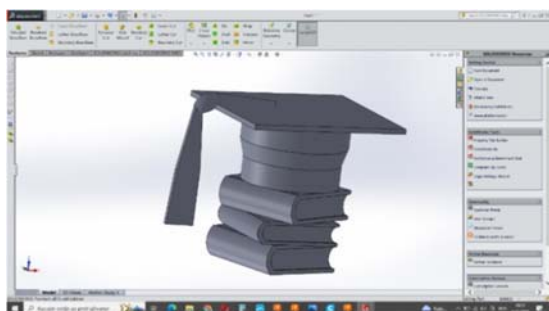
Debbabi i dr., 2010 smatraju da efekti 3D oglašavanja ukazuju da ciljne grupe izložene 3D oglašavanju, u poređenju sa s onima koji su bili izloženi 2D oglašavanju, su razvili svoja uvjerenja i stavove s više povjerenja, te iskazali povoljnije namjere kupovine. Ovo istraživanje podržava tvrdnju da 3D oglašavanje može podstaknuti istu reakcije potrošača kao kod onih pobuđenih neposrednim iskustvom [8].

Na Slikama 1 i 2 dati su prikazi ekrana SolidWorks-a sa dva modela kreirana u laboratoriji FabLab Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje. Ovi modeli zapravo predstavljaju određene „digitalne“ prototipove koji su nastali kao rezultat zajedničke saradnje naučnoistraživačke zajednice i privrede.

Posmatrani modeli konstruisani su iz više dijelova, a na Slikama 1 i 2 prikazani su nakon procesa sklapanja (u Assembly radnom okruženju SolidWorks-a).

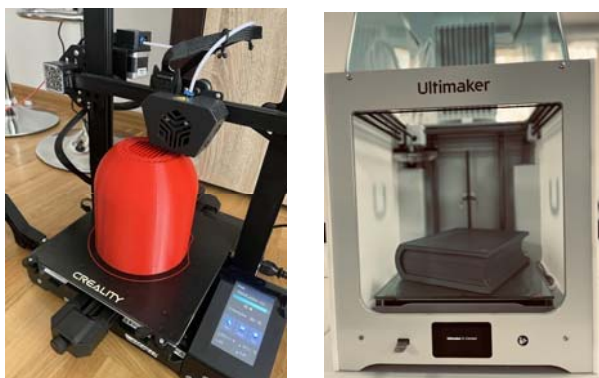


Slika 1- Radni prostor SolidWorks-a sa 3D modelom konstruisanim za potrebe HP Media Group Trebinje



Slika 2 - Radni prostor SolidWorks-a sa 3D modelom konstrisanim za potrebe Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje

Proces 3D štampanja koji slijedi nakon 3D modelovanja izvršen je parcijalno, zbog ograničenosti dimenzija i funkcionalnosti sklopova. Vizuelni prikaz 3D štampanja dat je na Slici 3.



Slika 3 - Prikaz procesa 3D štampanja modela sa Slika 1 i 2

Za štampanje modela korišćena su dva 3D štampača: Ultimaker 2+ CONNECT i Creality CR – 6 SE, kao materijal iskorišćena je PLA plastika u bijeloj, crvenoj, plavoj, sivoj i crnoj boji. Krajnji rezultat 3D modelovanja i štampanja prikazan je na Slici 4.



Slika 4 - Odštampani 3D modeli sa Slika 1 i 2

3D štampač Ultimaker 2+Connect je najnoviji 3D štampač od strane Ultimakera. Ovaj štampač je vizualno unaprijeđen, pojedini dijelovi su napravljeni od kvalitetnijih materijala radi izdržljivosti, a i neka manja

poboljšanja u obliku povećanja radnog prostora takođe su istaknuta. Od materijala podržava PLA i ABS.

3D štampač Creality CR-6 SE je potpuno novi proizvod na tržištu koji je dodatno unaprijeđen, te predstavlja novi standard u svojoj grupi proizvoda. Redizajn ekstrudera omogućava brže i kvalitetnije dodavanje materijala koje rezultuje većim kvalitetom 3D ištampanih modela.

Za 3D štampanje je veoma bitna tačnost zadatih dimenzija, što je i tema mnogih autora današnjice [9].

## 4 DISKUSIJA

Korištenjem 3D modela u tržišnoj komunikaciji postiže se bolji efekat uvjeravanja, podsjećanja i informisanja i rezonanca koja će potrošača vezati uz taj proizvod i plasiranu ideju.

Rezultati istraživanja i pregled dosadašnjih istraživanja u posmatranoj oblasti, ukazuju na mogućnost da će korištenje 3D dizajna u oglašavanju, donijeti niz prednosti. 3D odštampani model čini da oglas izgleda realističnije jer renderirana slika ima dubinu. Ideja predstavljena tržištu ovim putem, potrošače će zainteresovati više jer će 3D model izgledati stvarnije nego 2D, a potrošači radije kupuju ono što mogu da osjete i ostalim čulima. 3D odštampani model se lako apsorbuju okom, za razliku od 2D. 3D modeli prenose tačnu poruku i efikasnije komuniciraju. Prema [10], 3D oglasi izazivaju veću pažnju u poređenju sa klasičnim 2D ogasima.

U budućnosti bi privredeno društvo trebalo da nastavi sa korištenjem novih i naprednih tehnologija, kako bi privukli inovativnu i savremenu publiku.

## 5 ZAKLJUČAK

Iz ovog istraživanja može se izvući nekoliko implikacija. Sa teorijske strane, dobiveni rezultati doprinose jačanju literature o primjeni aditivne proizvodnje u području oglašavanja.

U istraživanju je korišten interdisciplinarni pregled literature (proizvodnja, marketing, informacione tehnologije), kako bi se poboljšalo razumijevanje uticaja

3D modeliranja u tržišnoj komunikaciji. Budući koraci koje treba napraviti u skladu sa našim istraživanjima uključuju procijenjivanje mogućih veza između različitih varijabli koje mjere efektivnost oglašavanja. Ovo istraživanje je samo početni korak u ispitivanju stanja prakse u korištenju aditivne proizvodnje u kreativnim industrijama Republike Srpske i može poslužiti kao osnova za detaljnija istraživanja. Kada je riječ o doprinosima, ovo istraživanje predstavlja jedan od pionirskih radova u izučavanju 3D modeliranja u tržišnoj komunikaciji u Republici Srpskoj, odnosno BiH.

Pored toga, u praktičnom smislu rezultati istraživanja daju određene smjernice za primjenu aditivne proizvodnje u kreativnim industrijama. Ovim istraživanjem će se podsticati razvoj inovativnog pristupa na način da se 3D modeliranje koristi u širokom spektru oblasti: inženjering, arhitektura, zabava, neki specijalni efekti,...

### Zahvalnost

Zahvalni smo Ministarstvu za naučnotehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske koje je sufinansiralo ovaj projekat i time doprinijelo da se ovo istraživanje izvrši.

## 6 LITERATURA

- [1] Topčić, A., Cerjaković, E., (2014). Izrada prototipa. Univerzitetski udžbenik, Univerzitet u Tuzli, ISBN 978-9958-0374-0-5.
- [2] Jurić, I., Garašić, I., Kožuh, Z., Eržišnik J., Udbinac, D., (2019). Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 3/2019, 113-119.
- [3] Godec, D., Šercer, M., (2015). Aditivna proizvodnja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, ISBN 978-953-7738-26-6.
- [4] Vorkapić, M., Simonović, A., Čočkalović, D., Đorđević, D., (2020). Implementacija aditivne proizvodnje u lean koncept. 42. Jupiter konferencija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 442-447.
- [5] Kisić, M., Damjanović, D., Katanić, M., Damjanović, M., (2022). Primjena 3D štampača u nastavi i istraživačkim aktivnostima za potrebe savremene industrije. XXVIII Skup TRENDOVI RAZVOJA: "UNIVERZITETSKO OBRAZOVANJE ZA PRIVREDU", Kopaonik, 257-260.
- [6] Baručija A., Kačmarčik J., Lemeš S., Unkić F., (2020). An Example of CMM and CAD Application in Reverse Engineering. Journal Mašinstvo 17(1-2), ISSN 1512-5173, 35-43.
- [7] Jovanović J., Spaić O., Tomović R., Ivanković R., (2014). Computer Aided Design of Grinding Wheel for Drill Flute Production. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 4(9), New York, 709-715.
- [8] Debbabi S., Daassi M., Baile S. (2010). Effect of online 3D advertising on consumer responses: The mediating role of telepresence, Journal of Marketing Management 26(9):967-992
- [9] Zaimović-Uzunović N., Kačmarčik J., Varda K., Lemeš S., Spahić D., (2019). 3D printing additive procedure model creation and dimensional check using CMM. Journal Mašinstvo 15(4), ISSN 1512-5173, 237-245.
- [10] Hatzithomas L., Zotou A.Y., Palla P. J., (2016), Measuring the impact of competitive advertising environment and ad-exposure time on 3D posters' effectiveness, Journal of customer behaviour, 15 (2), 153-172.