



# ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

---

## WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 66 Vol. 66	Br. 1 No. 1	1-48 1-48	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2021. 2021.
--------------------	----------------	--------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE  
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY  
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

### IZDAVAČ / PUBLISHER

**DUZS - Društvo za unapređivanje  
zavarivanja u Srbiji**

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

**Za izdavača / For Publisher**

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

### UREDNIŠTVO / EDITORIAL

**Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief**

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

**Tehnički urednik / Technical Editor**

Branislav Lukić, dipl.ing

**Redakcijski odbor / Editorial Board**

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

### REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat  
11000 Beograd

Tel / Fax + 381 (11) 2420-652  
(10-16h)

[duzs@eunet.rs](mailto:duzs@eunet.rs)

[www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)



### UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Dragoslav Dobraš, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд  
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije : časopis  
Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji = Welding &  
Welded Structures : Serbian Welding Society quarterly review  
/ glavni i odgovorni urednik Zoran Odanović. – Vol. 41, no. 1  
(1996)- . - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje  
zavarivanja u Srbiji, 1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno. Je nastavak: Zavarivač = 0513-8523  
ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije  
COBISS.SR-ID 105396743

### CENE I NARUDŽBINA ZA 2021.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

### PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

### ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Bulevar Arsenija Čamojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

## SADRŽAJ

## CONTENTS



## NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

## SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

05

**ANALIZA ZAVISNOSTI ZATEZNIH NAPONA -  
DEFORMACIJA TAČKASTO ELKTROTPORNO  
ZAVARENOG SPOJA PRIMENOM NELINEARNE  
METODE KONAČNIH ELEMENATA SA  
EKSPERIMENTALNOM VERIFIKACIJOM**

**TENSILE STRESS-STRAIN ANALYSIS OF  
RESISTANCE SPOT WELD USING NON - LINEAR FEM  
WITH EXPERIMENTAL VERIFICATION**

*M.N. Yusuf, W.E.W.A. Rahaman, Y.HP Manurung, M. Stoschka, M.A. Suhaimi, A.A.A. Rusli*



## NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

## SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

23

**KOMPARATIVNA ANALIZA FIZIČKOM SIMULACIJOM  
OMEKŠAVANJA ZUTA TRI RAZLIČITE  
ALUMINIJUMSKE LEGURE ZA VOZILA**

**COMPARATIVE HAZ SOFTENING ANALYSIS OF  
THREE DIFFERENT AUTOMOTIVE ALUMINIUM  
ALLOYS BY PHYSICAL SIMULATION**

*R.P.S. Sisodiaa, J. Kovács*



## OBRAZOVANJE

## EDUCATION

41

**KAKVI SU TO „PROHROMSKI“ ČELICI?**

*Dr Z.Karastojković, Dr R. Perić*



## VESTI

## NEWS

4

**IN MEMORIAM – NIKOLA ŠORMAZ**

22

**REČ OGLAŠIVAČA (WELD-ING DOO)**

39

**INŽENJERSKO RADIONIČKI PRIRUČNIK - OBLOŽENE ELEKTRODE ZA ZAVARIVANJE“ (Saša Pejkić)**

44

**OTKAZIVANJE SAJMA ESSEN 2021**

46

**PREGLED RADOVA 2020**

48

**MARKETING**

## ***Poštovani čitaoci,***

Protekla 2020. godina i pandemija koronavirusa promenila nam je praktično sve aspekte svakodnevnog života. Iako se borba sa virusom i dalje odvija, protekli meseci doveli su do značajnih promena kako u industriji uopšte, tako i u industriji zavarivanja. Trenutno je svet iz oblasti zavarivanja fokusiran ne samo na upravljanje kratkoročnim efektima ove krize, već i na dugoročnu pripremu za potencijalna prilagođavanja.

Ozbiljna priroda bolesti navela je proizvođače da najvećom brzinom prilagode radna okruženja, da budu dovoljno sigurna za povratak i normalan rad njihovih zaposlenih. Ekonomski efekti pandemije uticali su na različite načine na preduzeća u različitom stepenu, sa širokim spektrom posledica. Iako je većina preduzeća razumljivo zaokupljena rešavanjem velikog broja problema koje je izazvao Covid-19, postoji i izvestan stepen neizvesnosti u pogledu budućnosti industrije zavarivanja nakon rešavanja ove pandemije.

Nadajmo se da ćemo tokom ove godine da se izborimo sa ovom opakom bolešću i pandemijom i da ćemo se vratiti redovnom životu i radu u normalnim uslovima, što svi željno iščekujemo.

***Glavni i odgovorni urednik  
Dr Zoran Odanović, dipl.ing.***

---

**Podsećamo vas da je sada vreme da obnovite vaše članstvo u DUZS i pretplatu za naš časopis.**





## IN MEMORIAM

Dana 13. 03.2021. napustio nas je veliki prijatelj i kolega **Nikola Šormaz**



ŠORMAZ NIKOLA

1951 – 2021.

Rođen je 1951. godine u mestu Jaruga, Bosansko Grahovo, BiH.

Srednju školu završio je 1968., školu za VKV radnike 1970. u Obrenovcu, a gimnaziju 1976. godine u "Whiting High School", SAD. Potom je studirao mašinstvo tri godine u SAD na "Purdue University", nakon čega se vratio u Obrenovac i Srbiju 1978. godine.

Nastavlja svoje obrazovanje na Višoj tehničko-mašinskoj školi u Zemunu, koju završava 1984. godine, a 1987. polaže i stručni ispit propisan za mašinske inženjere. Visoku inženjersku školu strukovnih studija završio je 2010. godine u Beogradu-Zemun.

Kurs za međunarodnog inženjera zavarivanja završio je 2007., a 2011. godine i kurs za međunarodnog inspektora zavarivanja.

Bio je član DUZS od 2008. godine, a od 2016. i član Upravnog odbora DUZS.

Što se tiče bogate radne biografije, navešćemo da je Nikola od 1979-1980. godine radio za Termoelektro, na petrohemijskom kompleksu Abu Kamaš u Libiji, na poslovima organizacije prijema, skladištenja i izdavanja materijala i opreme za sve izvođače radova i ujedno bio prevodilac za engleski jezik. Od 1980. do 1989. godine bio je zaposlen u "Prvoj iskri" Barič OOUR "Posmak" na poslovima tehnologa za zavarivanje i bravarsko-montažerske radove, šefa gradilišta na toplifikaciji Obrenovca i šefa proizvodnje. Tih godina projektovao je i pogon za zavarivanje (5 miliona zavarenih spojeva na godišnjem nivou) za "Fabriku zapornih i regulacionih armatura za prehrambenu industriju" SAMARA, SSSR.

Od 1990. do 2007. godine odlazi u privatnike i vodi sopstveno preduzeće "Varing" za izradu i montažu procesne opreme, cevovoda i konstrukcije.

Od 2007. do zaslužene penzije radio je u JKP "TOPLOVOD" Obrenovac, u službi nadzora i investicija na kontroli zavarivanja.

U radu DUZS, Nikola Šormaz je najviše doprineo realizaciji ideje o takmičenju mladih zavarivača Srbije. Ovaj projekat je pokrenut 2012. godine u okviru DUZS, u cilju afirmacije zavarivanja kao zanimanja, promocije i podsticaja školovanja zavarivača, motivacije mladih ljudi i predstavljanja Srbije u oblasti zavarivanja na međunarodnim takmičenjima.

Uz ostale članove DUZS, svojim optimizmom, upornošću i verom u viši cilj, bez ikakve lične koristi, Nikola je istrajavao u naporima da se mladim zavarivačima iz naše zemlje omogući da usavrše svoje veštine, da se takmiče na nivou Srbije, a onim najboljima da stanu rame uz rame sa zavarivačima drugih zemalja na međunarodnim takmičenjima.

U maju 2013. godine u Termoelektrovom centru u Obrenovcu DUZS je organizovao prvo takmičenje mladih zavarivača "MLADI ZAVARIVAČ 2013" u saradnji sa Tehničkom školom Obrenovac, a Nikola je imao vodeću ulogu u njegovoj organizaciji. Pre svega Nikolinin ličnim trudom i zalaganjem, prikupljena su sredstva da mladi zavarivači iz Srbije učestvuju i na narednim međunarodnim takmičenjima: Evropskom takmičenju mladih zavarivača - European Welders Competition "WELDCUP" u okviru Sajma zavarivanja u Esenu u Nemačkoj, 2013. godine i "WELDCUP 2017" u Diseldorfu 2017. godine, na takmičenju srednjih škola u Slovačkoj 2015. godine, međunarodnom takmičenju zavarivača u Kini "ARC CUP", u Pekingu 2016. godine i "ARC CUP" 2019. godine, Langfang – Kina.

Pamtićemo Nikolu kao dobrog čoveka mladalačke energije, vedrog i iskrenog. Neka mu je večna slava i hvala.

DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji



Mohd Nazri Yusuf <sup>1,a</sup>, Wan Emri Wan Abdul Rahaman <sup>1,b</sup>, Yupiter HP Manurung <sup>1,c</sup>, Micheal Stoschka <sup>2,d</sup>, Muhammad Azim Suhaimi <sup>1,e</sup>, Ahmad Afiq Azim Rusli <sup>1,f</sup>

## Tensile stress-strain analysis of resistance spot weld using non-linear FEM with experimental verification

### Analiza zavisnosti zateznih napona - deformacija tačkasto elektrootporno zavarenog spoja primenom nelinearne metode konačnih elemenata sa eksperimentalnom verifikacijom

#### Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

#### Rad primljen / Paper received:

Januar 2021.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: A. Mitrašinović

#### Adresa autora / Author's address:

1 Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Malaysia

2 Christian Doppler Laboratory for Manufacturing Process based Component Design, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria

<sup>a</sup>nazdya13@gmail.com,

<sup>b</sup>emriwan80@gmail.com,

<sup>c</sup>yupiter.manurung@gmail.com,

<sup>d</sup>micheal.stoschka@unileoben.ac.at,

<sup>e</sup>azimsuhaimi95@yahoo.com,

<sup>f</sup>aafiqhazim@gmail.com

**Ključne reči:** Tačkasto zavarivanje, analiza konačnih elemenata

**Keywords:** Spot welding, finite element analysis

#### Abstract

This research presents an investigation on stress-strain behaviour induced by resistance spot weld followed by tensile shear test. The spot weld is modelled according to standardized dimension for tensile test with main material properties of Cu as electrode and low carbon steel S235 as plates with 1mm thickness which include electric conductivity, resistivity and heat transfer coefficient for solid body as well as contact interface. The FEM simulation is conducted using the process parameter of current between 6,000 A to 15,000 A, force at 5,000 N and different stages of time following the welding process and tensile test which is carried out after releasing both of the electrodes and material reaches the initial temperature with contact clamp velocity of 5mm/min. To ensure the glued elements between the plates, subroutine in MSC Marc/Mentat is used in the simulation with defined temperature. The outcome of simulation results will be verified with series of experiment. It is expected that simulation will give good agreement compared to experimental analysis within acceptable range of error.

#### 1. Introduction

Resistance spot welding is one of the most applied joining techniques for metal sheet which widely used in many industries such as automotive. Approximately more than 4,000 individual spot

#### Rezime

Ovo istraživanje predstavlja analizu ponašanja napona - deformacija elektrootporno tačkasto zavarenog spoja, pri ispitivanju smicajnim zatezanjem. Tačkasti zavareni spoj je modeliran u skladu sa standardizovanim dimenzijama za ispitivanje zatezanjem, sa glavnim osobinama Cu kao materijala elektrode i nisko-ugljeničnog čelika S235 kao ploče debljine 1 mm, koje uključuju električnu provodljivost, otpornost i koeficijent prenosa toplote za čvrsto telo kao i za kontaktne površine. Simulacija metodom konačnih elemenata (MKE) je sprovedena korišćenjem procesnih parametra: struje između 6000 A i 15000 A, sile od 5000 N i različitih vremenskih perioda procesa zavarivanja i zatim ispitivanja zatezanjem koja su vršena nakon oslobađanja elektroda i kada materijal dostigne početnu temperaturu, sa brzinom kontaktnog steznja od 5 mm / min. Da bi se obezbedilo prijanjanje dodirnih elemenata između ploča, u simulaciji je korišćen potprogram u MSC Marc / Mentat sa definisanim temperaturama. Rezultati simulacije biće verifikovani serijom eksperimenata. Očekuje se da će simulacija dati dobro slaganje sa eksperimentalnom analizom sa prihvatljivim opsegom grešake.

#### 1. Uvod

Elektrootporno tačkasto zavarivanje je jedna od najčešće primenjivanih tehnika spajanja metalnih limova koja se široko koristi u mnogim industrijama poput automobilske. Otprilike više od 4,000



welds are applied to assemble a vehicle body and the related parts [1].

Spot welded joint is made by the combination of heat, pressure and time. The fusion occurred through weld nugget, which is formed as a result of large amount of heat generated due to high contact resistance to the high current flow at low voltage. The spot welded joint quality is subjected to electric current flow time, sheet thickness, the amount of welding current, cross-sectional area, and contacts surfaces of the welding tips. [2].

The key advantage of spot welding technique is time and cost efficient as well as highly suitable for automation. In vehicle design, strength of spot welded joint is among of safety factor to be considered in crash test analysis [3]. In spite of rapid change in welding technology over the past decades, resistance spot welding is remain practical as a subject of interest by many researchers.

The spot welded joint quality is commonly studied experimentally through various method of test such as microstructure examination, shear testing, cross tension testing, peel testing and hardness test but experimental approach alone will be too costly and time inefficient. To reduce cost and time, simulation approach through mathematical model is oftenly used by researchers and engineers to visualize and represent the actual problem. Finite Element Method (FEM) was known as one of efficient methods to analyze different phenomenon of engineering problem with capability to produce a much more detailed set of results compared with experimental investigations [4]. In the present study, a non-linear FE based software MSC.Marc was used to simulate the resistance spot welding process and a tensile test is modelled for comparison with the actual experiment [5].

## 2. Resistance Spot Welding Process – A Fundamental Theory and FEM

Resistance spot welding is a process in which faying surfaces are joined in one or more spots by resistance to the flow of electric current through work pieces that are held together under force by electrodes [6]. Spot welding is operating based on amount of current that passes through the work piece, pressure of electrode on the work piece, time of current flow through the work piece and area of electrode tip with the work piece. The key parameters of spot welding process are electrode force, diameter of electrode contact surface, squeeze time, weld time, hold time and weld current.

zavarenih spojeva je neophodno za formiranje jedne karoserije vozila i pripadajućih delova [1].

Tačkasti zavareni spoj se izrađuje kombinacijom toplote, pritiska i vremena. Spoj se ostvaruje formiranjem sočivastog šava, koji nastaje kao rezultat povećanja količine toplote usled visokog otpora protoku struje niskog napona. Kvalitet zavarenih spojeva zavisi od vremena protoka električne struje, debljine ploča koje se zavaruju, jačini struje zavarivanja, površine poprečnog preseka, i kontaktnih površina elektroda za zavarivanje [2]. Ključne prednosti tehnike tačkastog zavarivanja su niski troškovi i brzina, i izuzetna podobnost za automatizaciju procesa. Prilikom projektovanja vozila, čvrstoća tačkasto zavarenog spoja je jedan od najvažnijih sigurnosnih faktora koji se uzimaju u obzir u analizi testa sudara [3]. Uprkos brzim promenama tehnologije zavarivanja tokom poslednjih decenija, tačkasto zavarivanje i dalje ostaje predmet interesovanja mnogih istraživača. Kvalitet zavarenih spojeva obično se proučava različitim metodama ispitivanja, kao što su ispitivanje mikrostrukture, ispitivanje smicanjem, ispitivanje poprečnog zatezanja i ispitivanje tvrdoće. Samo eksperimentalni pristupi analizama su skupi i vremenski neefikasni. Da bi se smanjili troškovi i vreme, istraživači i inženjeri često koriste simulacioni pristup kroz matematički model kako bi vizualizovali i predstavili stvarni problem. U poređenju sa eksperimentalnim istraživanjima, metoda konačnih elemenata (MKE) je poznata kao jedna od efikasnih metoda za analizu različitih inženjerskih problema sa mogućnošću da pruži veći broj detaljnijih rezultata [4]. U ovoj studiji, nelinearni softver konačnih elemenata (KE) zasnovan na softveru MSC.Marc, je korišćen za simulaciju procesa elektrotopnog tačkastog zavarivanja i modelirano je ispitivanje zatezanjem radi poređenja sa eksperimentom [5].

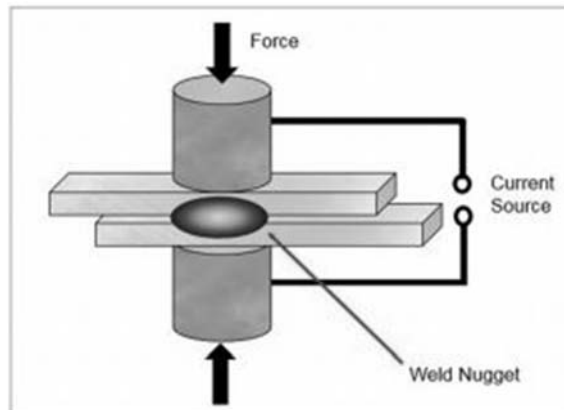
## 2. Proces elektrotopnog tačkastog zavarivanja - osnovna teorija i MKE

Otporno tačkasto zavarivanje je postupak u kojem se radne površine spajaju na jednom ili više mesta usled otpora materijala na protok električne struje kroz radne komade koji su elektrodama pričvršćeni jedni za druge [6]. Tačkasto zavarivanje deluje na osnovu količine struje koja prolazi kroz radni predmet, pritiska elektrode na radni predmet, vremena protoka struje kroz radni predmet i površine vrha elektrode sa radnim delom. Ključni parametri postupka tačkastog zavarivanja su sila i trajanje stezanja, prečnik kontaktne površine elektrode, trajanje zavarivanja i struja zavarivanja.



Fig. 1 illustrates the basic spot welding principle

Slika 1 ilustruje osnovni princip tačkastog zavarivanja.



**Figure 1. Basic principle of resistance spot welding**  
**Slika 1. Osnovni princip elektrootpornog tačkastog zavarivanja**

According to Ohm's law,

$$E = IR \dots\dots\dots(1)$$

Where I is the current, E is voltage drop across the electrodes and R is the resistance through the material in ohms. R is the summation of the contact resistances and the resistance of the work to be welded. Therefore, for a given value of R, the magnitude of I is determined by E. Current to the primary of the transformer is controlled which, in turn, determines the current delivered to a weld of a given resistance [7]. The total heat in watt-seconds generated in the work being welded and in the welding electrodes is expressed by the formula:

$$H = I^2RT \dots\dots\dots(2)$$

$$H = IET \dots\dots\dots(3)$$

(T is time in seconds)

The welding cycle is divided into four time segments: squeeze, heat/ weld, hold and off [8] as shown in Fig. 2.

Prema Omovom zakonu

$$E = IR \dots\dots\dots(1)$$

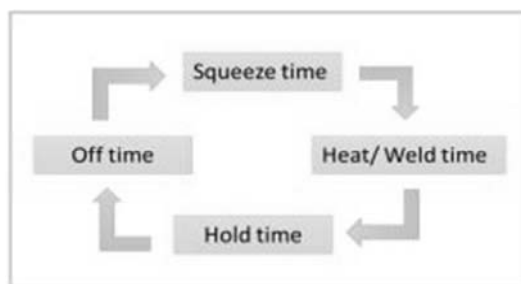
gde je I stuja, E je pad napona duž elektrode i R je otpor kroz materijal. R (u Ohm-ima) je zbir svih kontaktnih otpora i otpora radnog predmeta koji se zavaruje. Prema tome, za datu vrednost R, veličina I je određena sa E. Struja ka primarnom transformatoru je kontrolisana što zauzvrat određuje jačinu isporučene struje na dati zavereni spoj [7]. Ukupna toplota u vat-sekundama stvorena na elektrodama tokom procesa zavarivanja izražava se formulom:

$$H = I^2RT \dots\dots\dots(2)$$

$$H = IET \dots\dots\dots(3)$$

(T je vreme uzraženo u sekundama)

Ciklus zavarivanja je podeljen u četiri vremenska segmenta: pričvršćivanje, zagrevanje/zavarivanje, zadržavanje i isključivanje [8] kako je prikazano na Slici 2.



**Figure 2. Spot welding cycle**  
**Slika 2. Ciklus tačkastog zavarivanja**

- Squeeze time: time between pressure application and weld.
- Heat or weld time: Interval of welding current flows through the circuit (60 cycles = 1 second).
- Hold time: welding current is off, the electrode force is held

- Trajanje stezanja: vreme između primene pritiska stezanja i trenutka zavarivanja.
- Trajanje zagrevanja ili zavarivanja: Interval struje zavarivanja (60 ciklusa = 1 sekunda).
- Trajanje zadržavanja: struja zavarivanja je isključena, dok pritiskajuća sila elektroda je aktivna.



■ Off-time: interval from the end of the hold time until the beginning of the squeeze time for the next cycle. Retract the electrodes, remove or reposition work piece.

Finite element analysis (FEA) is a mathematical method used to resolve engineering problems. However, some of FEA based software may not be able to accurately simulate resistance spot welding process as it is governed by electrical, thermal, mechanical and metallurgical phenomena. To resolve these complex problems, a Finite Element based software MSC.Marc was used. It is difficult to simulate the RSW process because three different physical phenomena are interacting with each other. The model takes the following physical and metallurgical interactions into consideration in the simulations, interaction between the electro-kinetics and heat transfer via the Joule effect, heat transfer and phase transformations through latent heat and heat transfer, electro-kinetics, and mechanical behaviour via contact conditions [9].

The welding process starts with analysing the squeeze cycle in which electrode force is applied to the electrodes. The results of this mechanical analysis include initial deformations and contact area, which serve in an electro-thermal analysis. At this point, the temperature distribution of Joule heating is calculated for an increment from the fully coupled electrical-thermal FEA. In the electrically-thermally coupled analysis the electrical and thermal boundary conditions are utilized in the model of a house. Then the calculations of Joule heating at the sheet-sheet and electrode-sheet faying surfaces, as well as in the base material and electrode have to be done. As a consequence, the temperature distributions are held in the first increment and sent to the mechanical analysis as a nodal thermal load. Contact pressure and deformations are the consequences of mechanical analysis that obtains a new contact condition. Thus, the mechanical results are transmitted to the electro-thermal analysis to update contact conditions for the next increment analysis. This loop goes on until the welding time is finished [10].

The mesh is graded from fine to coarse, according to the expected reduction in temperature gradient on moving away from the heat source. Solid elements were used to simulate the thermo-elastic-plastic behaviour of the sheets and electrodes. Contacts were employed to simulate the contact areas. In that respect there are three contact fields in the exemplar according to Sun, D., Zhang, Y., Liu, Y., Gu, X., & Li, H. [11]. Fig. 3 below shows the mesh generation of a developed model. Contact area 1 and 2 shows the electrode-work piece interface and

■ Vreme isključenja: interval od kraja perioda zadržavanja do početka vremena stiskanja za sledeći ciklus. Povlačenje elektrode, uklanjanje i zamena radnog predmeta.

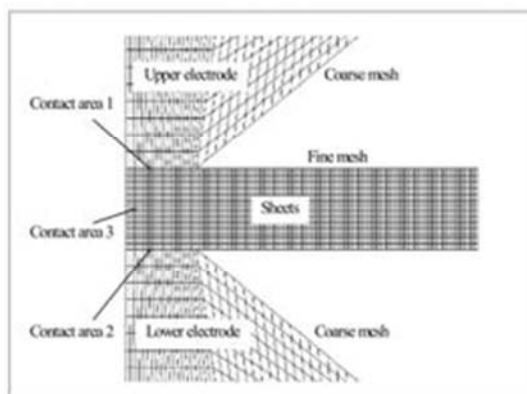
Analiza konačnih elemenata (MKE) je matematička metoda koja se koristi za rešavanje inženjerskih problema. Međutim, neki od softvera zasnovanih na MKE ne mogu precizno da simuliraju postupak tačkastog zavarivanja, zato što su ti procesi vođeni složenim električno-termičkim, mehaničkim i metalurškim fenomenima. Da bi se rešili ovi složeni problemi korišćen je MSC.Marc softver zasnovan na konačnim elementima. Teško je simulirati proces elektrootpornog tačkastog zavarivanja jer tri različita fizička fenomena su međusobno povezana. Ovaj kompjuterski model uzima u obzir sledeće fizičke i metalurške interakcije tokom simulacije procesa: interakciju između elektro-kinetike i prenosa toplote pomoću Joule-ovog efekta, prenos toplote i fazne transformacije uzimajući u obzir latentnu toplotu i prenos toplote, elektro-kinetiku, i mehaničko ponašanje preko uslova na kontaktima [9].

Proces zavarivanja započinje analizom ciklusa pričvršćivanja u kome elektrode pritiskaju radni predmet. Rezultati mehaničke analize uključuju početne deformacije i kontaktnu površinu, koje omogućuju elektrotermičku analizu. Zatim se izračunava raspodela temperature usled Džulovog grejanja za svaki priraštaj povezane električne i termičke MKE analize. U električno-termički povezanoj analizi električni i toplotni granični uslovi su upotrebljeni u ovom modelu. Tada se izvršavaju proračuni Joule-ovog zagrevanja na kontaktnim površinama između dva radna predmeta kao i na površini radni predmet - elektroda. Izračunata raspodela temperature u prvom koraku se koristi za mehaničku analizu kao nodalno termičko opterećenje. Promena kontaktnog pritiska i deformacije su posledice mehaničke analize koja određuje novo kontaktno stanje. Dakle, mehanički rezultati se vraćaju u elektro-termalnu analizu kako bi se ažurirali uslovi kontakta za sledeću inkrementalnu analizu. Ova petlja traje sve dok se ne dostigne zadato vreme trajanja zavarivanja [10]. Mreža koja pokriva radni komad, je razvrstana od fine do grube sa udaljenjem od izvora toplote, zbog očekivanog smanjenja gradijenta temperature u tom pravcu. Puni elementi su korišćeni za simulaciju termo-elastično-plastičnog ponašanja radnih predmeta i elektroda. Simulacija kontaktnih područja je izvršena na kontaktima. U tom pogledu su korišćena tri kontaktna polja u primeru Sun, D., Zhang, Y., Liu, Y., Gu, X., & Li, H. [11]. Slika 3. prikazuje formiranje mreže u razvijenom modelu.



contact area 3 represents the faying surface. In order to obtain a reliable results, fine meshes were created near these contact areas, while the meshes of other areas were relatively coarse.

Kontaktne površine 1 i 2 pokazuju interfejs između elektrode i radnog predmeta, a kontaktna površina 3 predstavlja naslanjajuću površinu radnog predmeta. Da bi se dobili pouzdani rezultati, u blizini ovih kontaktnih područja stvorena je fina mreža, dok su mreže ostalih područja relativno grube.

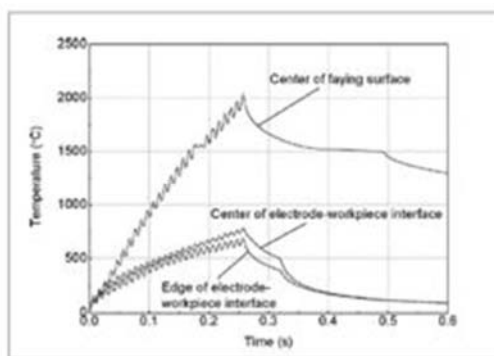


**Figure 3.** The mesh generation of a developed model

**Slika 3.** Formiranje mreže razvijenog modela

Fig. 4 shows the temperature changing histories at three locations: the centre of nugget, the centre of the electrode and work piece interface and the edge of the electrode. In this analysis, the temperature field was taken as Finite Element Method (FEM) nodal load and applied on every node of the model.

Slika 4 prikazuje istorijat promena temperature na tri lokacije: centru sočivastog šava, centru elektrode i dodira radnog predmeta i ivice elektrode. U ovoj analizi temperaturno polje je uzeto kao čvorno opterećenje metode konačnih elemenata (MKE) i primenjeno na svaki čvor modela.



**Figure 4** Temperature histories at three locations

**Slika 4.** Temperaturne istorije na tri lokacije

Generally, contact resistance decreases with increasing temperature. At the metal surface many impurities are available (i.e. Oil, dirt, and oxides). As temperature increases, few of these impurities burn with the metal in initial cycles. These impurities softened at high temperature and this causes decrease in contact resistance with an increase in temperature [12].

A theory of plasticity is developed for a material which is initially isotropic and fulfils the maximum shear stress initial yield condition. It is proven that the most general piecewise linear theory depends upon 5 material constants. These admit the initial

Generalno, otpor na kontaktima opada sa porastom temperature. Na metalnoj površini postoje mnoge nečistoće (npr. ulje, prljavština i oksidi). Sa povećanjem temperature u početnim ciklusima mala količina ovih nečistoća sagoreva sa metalom. Ove nečistoće omekšavaju sa povećanjem temperature i prouzrokuju smanjenje otpora na kontaktima [12].

Teorija plastičnosti je primenjena na materijalu koji je u početku izotropan i zadovoljava maksimalni napon smicanja pri početnim uslovima popuštanja. Poznato je da najopštija linearna teorija zavisi od 5 konstanti materijala. Te konstante su početni napon



yield stress, the rate of hardening, and three constants which identify the effect of hardening upon the condition for further yielding [13]. The general form of power-law stress-strain curve model has the following equation  $\sigma = A\varepsilon^n$ , whereby  $n$  is the strain hardening coefficient, and  $A$  is the constant which are adjusted to best fit measured stress-strain data. The value of  $n$  should be in the range 0-1 in order to model concavedownward behaviour [14]. The power - law model is used extensively because of its mathematical simplicity, however, only certain types of stress strain behaviour can be modelled with it.

Plasticity can also be applied to analyse weld residual stresses and deformation. At that point is exit unique relationship between the inherent shrinkage strains and the weld residual stresses and deformation. This analysis can be expanded to incorporate the effects of initial deformation, interaction between neighbouring welds, welding sequence, and also structural stiffness. To use the plasticity in practical situations, normally it requires a mock up welding test calibrating the engineering solutions for characteristic process parameters, material non-linearities and geometrical constraints.

### 3. Experimental and FEM Procedure of RSW

Throughout this research works, simulation of resistance spot welding process is being done simultaneously with the experiment to validate each of the result. FEA based, MSC.Marc software is used for the simulation while experimentally is done using Wimtouch 1800 Spot Welding Machine as shown in Fig. 5.

tečenja, brzina ojačavanja i tri konstante koje određuju efekat ojačavanja pod uslovom za dalje tečenje [13]. Opšti oblik krive zavisnosti napona od stepena deformacije je izražen sledećom jednačinom  $\sigma = A\varepsilon^n$ , pri čemu je  $n$  - koeficijent deformacionog ojačavanja, a  $A$  - konstanta koja je prilagođena da najbolje odgovara izmerenim vrednostima napon - deformacija. Vrednost  $n$  treba da bude između nula i jedan da bi model imao konkavno - opadajuću krivu [14]. Model zavisnosti snage se koristi u velikoj meri zbog svoje matematičke jednostavnosti, međutim, na taj način se mogu modelirati samo određene vrste naprezanja.

Plastičnost se takođe može primeniti za analizu zaostalih napona i deformacija zavarenog spoja. U tom slučaju, izlazne vrednosti prikazuju odnos između svojstvenih napona usled skupljanja materijala i zaostalih napona i deformacija zavarenog spoja. Ova analiza se može proširiti tako da obuhvati efekte početne deformacije, interakciju između susednih zavarenih spojeva, redosled zavarivanja, kao i krutost strukture. Da bi se koncept plastičnosti koristio u praktičnim situacijama, obično je potreban zavarivački test kalibracije, čime se definišu inženjerske vrednosti za karakteristične procesne parametre, nelinearnosti materijala i geometrijska ograničenja.

### 3. Eksperimentalne i KME procedure elektrotopnog zavarivanja

Tokom ovoga istraživanja, simulacija elektrotopnog tačkastog zavarivanja je izvršena uporedo sa eksperimentima, da bi potvrdili svaki rezultat. MKE je zasnovan na MSC.Marc programu koji je korišćen za simulaciju, dok su eksperimenti izvršeni na Wimtouch 1800 mašini za zavarivanje, što je prikazano na Slici 5.



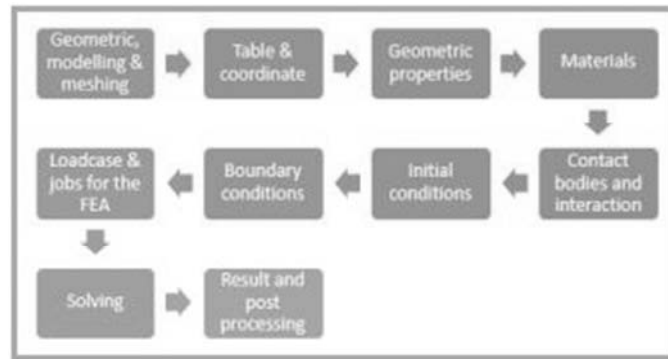
**Figure 5. Wimtouch 1800 Spot Welding Machine**  
**Slika 5. Wimtouch 1800 mašina za tačkasto zavarivanje**



Finite Element Analysis (FEA) approach was applied in the simulation of spot welding process which consists of 3 phases, pre-processing, solving and post-processing. The modelling of the geometry of the components are drawn directly in the MSC.Marc software.

The simulation procedure of RSW in MSC.Marc is shown in Fig. 6 below:

Analiza Konačnih Elemenata (MKE) je primenjena u simulaciji postupka tačkastog zavarivanja koji se sastoji od tri faze: preprocesiranja, rešavanja i postprocesiranja podataka. Modeliranje geometrije komponenata je izvršeno direktno u MSC.Marc programu. Simulacija procedure tačkastog zavarivanja u program MSC.Marc je prikazana na Slici 6:



**Figure 6.** RSW simulation procedures using MSC.Marc

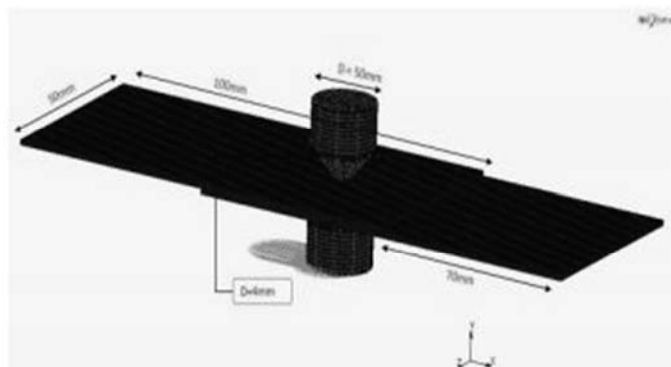
**Slika 6.** Procedura otpornog tačkastog zavarivanja koja koristi MSC.Marc program

Spot welding is governed by electrical-thermal, mechanical and metallurgical phenomena. The model takes the following physical and metallurgical interactions into consideration in the simulations: interaction between the electro-kinetics and heat transfer via the Joule effect, heat transfer and phase transformations through latent heat and heat transfer, electro-kinetics, and mechanical behaviour via contact conditions [15].

A three dimensional model consist of two sheets and two electrodes were modelled in MSC.Marc and dimensionally similar to the actual experimental procedure. MSC.Marc provides a three dimensional meshing with a tetrahedron shaped element. The accuracy of finite element model always depends on meshing. The mesh is graded from fine to coarse, according to the expected reduction in temperature gradient which moving away from the heat source [16]. Fig. 7 shows the modelling of RSW in MSC.Marc.

Tačkasto zavarivanje je određeno električno-termičkim, mehaničkim i metalurškim fenomenima. Korišćeni model uzima u obzir sledeće fizičke i metalurške interakcije u simulacijama: interakcija između elektro - kinetike i prenosa toplote pomoću Joul-ovog efekta, prenosa toplote i faznih transformacija pomoću latentne toplote i prenosa toplote, elektro-kinetika i mehaničko ponašanje putem uslova na kontaktima [15].

Trodimenzionalni model u MSC.Marc programu se sastoji od dva radna predmeta i dve elektrode i dimenzionalno odgovaraju eksperimentalnom postupku. MSC.Marc pruža trodimenzionalno formiranje tetraedarske mreže. Tačnost modela baziranih na metodi konačnih elemenata uvek zavisi od gustine mreže. Mreža je razvrstana od fine do grube, u skladu sa očekivanim smanjenjem temperaturnog gradijenta koji se udaljava od izvora toplote [16]. Slika 7 prikazuje modelovanje RSW u MSC.Marc.



**Figure 7.** RSW modelling in MSC.Marc

**Slika 7.** Modeliranje otpornog tačkastog zavarivanja u MSC.Marc programu



For boundary condition in MSC.Marc software, it is necessary to be set up adequately to receive dependable outcomes. The boundary condition includes structural fixed displacement, structural point load (electrode force), thermal fixed temperature, current/thermal fixed voltage and current/thermal point current. At the top electrode, the electrical current was applied uniformly and flow to the tip of the electrode. Selection of the nodes for each boundary condition must be properly selected to prevent errors which could be associated to it.

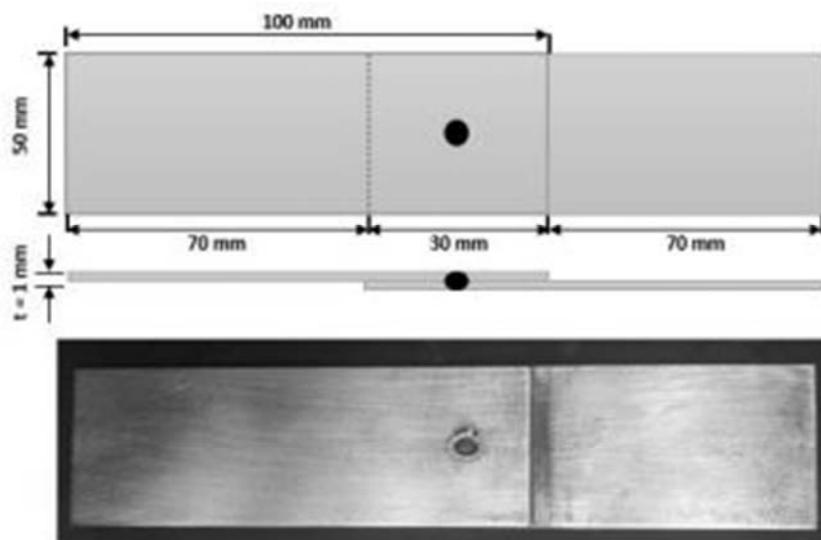
In experimental study, low carbon steel material was used as the specimen based on several factors. The mechanical properties of the base metals were found using a spark emission machine and using a standard tensile test in conformity with ASTM E8M [17]. The chemical composition of the material is shown in Tab. 1 below while the dimension of the specimen is shown in Fig. 8. A standard size 100 x 50 x 1 mm for the base metal was prepared for experimental process according to AWS D8.9m [18]. However, in simulation, the geometry was created in the form of electrode and metal sheet only as the focus will be more towards the joining area.

Neophodno je odrediti odgovarajuće granične uslove u MSC.Marc softveru, da bi se dobili pouzdani rezultati. Granični uslov uključuju fiksno strukturno pomeranje, strukturno tačkasto opterećenje (sila elektrode), temperaturu, fiksirane struja/napon i struja/termička tačka vrednosti. Na gornjoj elektrodi električna struja je primenjena ravnomerno u pravcu vrha elektrode. Izbor nodalnih tačaka za svaki granični uslov mora biti pravilno odabran kako bi se sprečile greške.

U eksperimentalnom istraživanju, kao uzorak je korišćen materijal od nisko-ugljeničnog čelika zbog nekoliko faktora. Mehaničke osobine određene su primenom standardnog ispitivanja zatezanjem u skladu sa ASTM E8M, a hemijski sastav određen je optičkom emisionom spektroskopijom [17]. Hemijski sastav materijala prikazan je u Tabeli 1, dok su dimenzije uzoraka prikazane na Slici 8. Standardna veličina 100x50x1 mm za bazni metal pripremljena je za eksperimentalni postupak prema AWS D8.9m [18]. Međutim, u simulaciji je geometrija kreirana samo za sklop elektrode i radnog predmeta, zato što je fokus usmeren na područje zavarenog spoja.

**Table 1.** S235 chemical composition (%)  
**Tabela 1.** S235 hemijski sastav (%)

C	Cu	Fe	Mn	N	P	S
0.15	0.4	98.293	1.1	0.01	0.02	0.027



**Figure 8.** Dimension of the specimen  
**Slika 8.** Dimenzije uzorka

Fig. 9 below shows the type of electrode used for the experiment which made of copper with truncated cone tips. The function of the electrode tips are for weld current to be conducted through the workpiece and form sufficient pressure for heat

Slika 9 prikazuje vrstu elektrode koja je korišćena za eksperiment, koja je izrađena od bakra sa skraćenim konusnim vrhovima. Funkcija vrhova elektroda je da se struja zavarivanja provodi kroz radni predmet i formira dovoljan pritisak radi



to be generated at the spot welded point. The tips must maintain their integrity of shape and characteristics of thermal and electrical conductivity under working conditions. The diameter of the electrode tip that was used is 4 mm. Same geometry of the electrode is then modelled in the simulation.

stvaranja toplote na mestu zavarenog spoja. Pod radnim uslovima vrhovi moraju održavati integritet oblika i date toplotne i električne karakteristike provodljivosti. Prečnik vrha elektrode od 4 mm je korišćen. Ista geometrija elektrode je korišćena u simulaciji.



**Figure 9.** Truncated cone electrode tip  
**Slika 9.** Vrh skraćene konusne elektrode

### 3.1 Welding Parameters

Tab. 2 below shows the parameter used for the spot welding process during the experiment. The spot welding was carried out to four specimens with same parameters except the weld current.

### 3.1 Parametri zavarivanja

Tabela 2 prikazuje parametre koji se koriste za proces tačkastog zavarivanja tokom eksperimenta. Tačkasto zavarivanje izvedeno je na četiri uzorka sa istim parametrima, osim struje zavarivanja.

**Table 2.** Welding parameter at different levels  
**Tabela 2.** Parametri zavarivanja na različitim nivoima struje zavarivanja

Welding Parameter Parametri zavarivanja	Unit Jedinica	Level 1 Nivo 1	Level 2 Nivo 2	Level 3 Nivo 3	Level 4 Nivo 4
Electrode force Pritisak elektroda	kN	5	5	5	5
Squeeze time Vreme stiska	Cycle	25	25	25	25
Weld time Vreme zavarivanja	Cycle	17	17	17	17
Hold time Vreme držanja	Cycle	10	10	10	10
Weld current Struja zavarivanja	kA	6	8	10	15

### 3.2 Tensile Test

At different parameters, there will be different tensile strength value [19]. As such, perfect

### 3.2 Ispitivanje zatezanjem

Pri različitim parametrima dobijaju se različite vrednosti zatezne čvrstoće [19]. Određivanje savršenih kombinacija parametara je važno radi



combination of parameters is important to achieve expected tensile shear strength. Fig. 10 below shows the Instron 3382 model machine which was used in conducting the tensile test on the specimen. This machine is ideal for tension and/or compression applications for test up to 100 kN load and provides simplicity, reliability, and affordability for product testing. Meanwhile, in simulation, tensile test was conducted after the spot welding and cooling process. Top sheet was set to fixed in all directions while the bottom sheet is stretched.

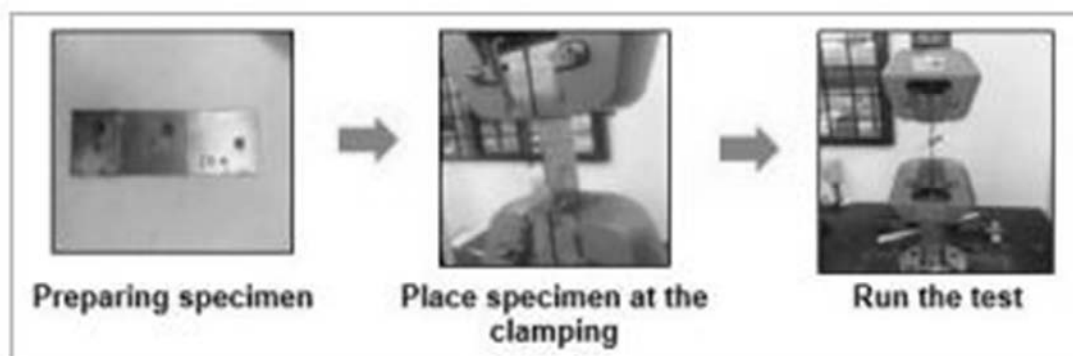
postizanja očekivanih zateznih smicajnih čvrstoća. Na slici 10 prikazana je mašina modela Instron 3382 koja je korišćena za ispitivanje zatezanjem. Ova mašina je idealna za ispitivanja zatezanja i/ili pritiska za opterećenja do 100 kN jer pruža jednostavnost, pouzdanost i pristupačnost ispitivanja uzoraka. Simulirano je ispitivanje zatezanjem nakon tačkastog zavarivanja i hlađenja. Gornja ploča je fiksirana u svim pravcima, dok se donja ploča zateže.



**Figure 10.** Instron 3382 Machine  
**Slika 10.** Mašina Instron 3382

Prior to conducting the tensile test, the specimen is prepared and the dimension is recorded. Subsequently, the specimen is clamped tightly at both end and run at constant speed of 5 mm/minute. The tensile shear test procedure is shown in Fig. 11 below.

Pre izvođenja ispitivanja zatezanjem, uzorak je pripremljen i ubeležene su dimenzije. Zatim je uzorak čvrsto stegnut na oba kraja i zatezanje je vršeno konstantnom brzinom od 5 mm / minutu. Postupak ispitivanja smicajnog naprežanja je prikazan na Slici 11.



**Figure 11.** Tensile test procedures  
**Slika 11.** Procedura ispitivanja zatezanjem

#### 4. Result and Discussion

In this research, simulation of resistance spot welding was carried using FEA based software,

#### 4. Rezultati i diskusija

U ovom istraživanju izvršena je simulacija tačkastog zavarivanja pomoću MSC.Marc softvera zasnovanog na MKE. Podaci korišćeni u simulaciji



MSC.Marc. The data used in the simulation for the geometry and materials is conform with the experimentation. The simulation was run at different values of weld current which is at 6kA, 8kA, 10kA and 15 kA. Both simulation and experiment were carried out until the tensile test to develop better understanding on the effect selected parameters to the tensile strength of a spot welded joint.

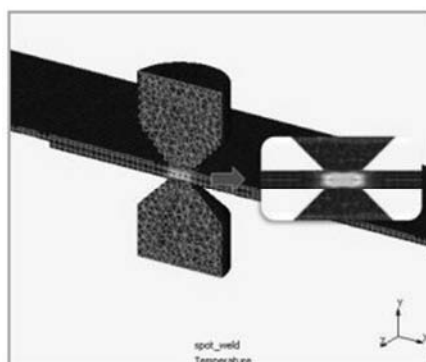
#### 4.1 Plasticity

The essential problem in the solution of a plasticity problem is to determine how stresses and strains can be found for a specified state of loading on a body. Plasticity used in this simulation involving Piecewise Linear for strain rate method. Material used in the simulation is initially isotropic and fulfills the maximum shear stress initial yield condition. The stress-strain curves were represented using Power Law model equation.

za geometriju i materijale u skladu su sa eksperimentalnom postavkom. Simulacija je izvedena pri različitim vrednostima struje zavarivanja koja iznosi 6 kA, 8 kA, 10 kA i 15 kA. Simulacija i eksperiment su korišćeni kako bi se ostvarilo bolje razumevanje efekata izabranih parametara na zateznu čvrstoću tačkasto zavarenog spoja.

#### 4.1 Plastičnost

Suštinski problem u rešavanju problema plastičnosti je kako utvrditi veličinu napona i deformacija opterećenog tela. Plastičnost korišćena u ovoj simulaciji koristi metodu linearne zavisnosti za određivanje stepena zatezanja. Materijal korišćen u simulaciji je u početku izotropan i ispunjava početni uslov maksimalnog napreznja na smicanje. Krive napreznje-deformacija su predstavljene pomoću stepene jednačine.



**Figure 12.** Weld nugget formation in simulation

**Slika 12.** Formiranje sočivastog šava zavarenog spoja pri simulaciji

A modification of Ohm's Law can be made when watts and heat are considered synonymous. When current is passing through a conductor the electrical resistance exist between the conductor will cause the heat to be generated. Fig. 12 above shows the temperature profile of spot welding process in simulation. The nugget was formed in the region of peak temperature. In spot welding, the heat generated is directly proportional to the welding current.

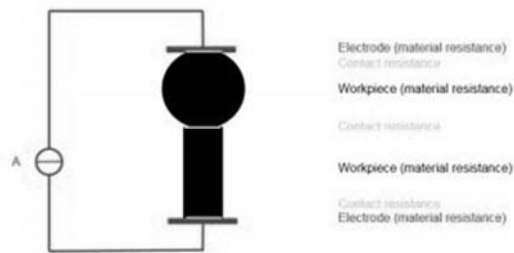
#### 4.2 Contact Resistance/ Conductance

In the simulation of resistance spot welding, electrical contact resistance or conductance is one of important element to be considered and the data will have significant effect to the result of the simulation. Fig. 13 below shows the resistances which exists during the spot welding process.

Modifikacija Omovog zakona može se izvršiti ako se jedinice vat i toplota posmatraju kao sinonimi. Kada struja prolazi kroz provodnik, električni otpor između provodnika će dovesti do stvaranja toplote. Slika 12 prikazuje temperaturni profil simuliranog tačkastog zavarivanja. Sočivasti šav je nastao u predelu najviše temperature. Pri tačkastom zavarivanju, proizvedena toplota je direktno proporcionalna struji zavarivanja.

#### 4.2 Otpor/provodljivost kontakta

U simulaciji otpornog tačkastog zavarivanja, otpor na električnim kontaktima i provodljivost su važni elemenati koje treba uzeti u obzir, čiji podaci imaju značajan uticaj na rezultate simulacija. Slika 13 prikazuje otpore tokom postupka tačkastog zavarivanja.



**Figure 13. Resistance in Spot Welding Process**  
**Slika 13. Otpor u procesu tačkastog zavarivanja**

The contact resistance can be expressed with the following equation:

$$R = \rho l / A \dots\dots\dots(4)$$

Where R is the electrical contact resistance,  $\rho$  is the electrical contact resistivity, l is the film thickness of the contact area and A is the contact area. In MSC.Marc electrical contact conductance is used instead of contact resistance. However, electrical contact conductance is the reciprocal of the electrical resistance. In most cases the electrical contact resistance is 30 times larger than the electrical material resistance. Electrical material resistance and electrical contact resistance are strongly depending on temperature. Additionally the electrical contact resistance is also depending on contact pressure. During the welding process the electrical contact resistance decreases rapidly whereas the electrical material resistance increases. Fig. 14 below shows the curves of electrical material resistance, electrical contact resistance and the complete resistance of the system during resistance spot welding process:

Otpor kontakta može se izraziti sledećom jednačinom:

$$R = \rho l / A \dots\dots\dots(4)$$

gde je R otpor električnog kontakta,  $\rho$  otpor električnog kontakta, l je debljina filma površine kontakta, dok je A površina kontakta. U MSC.Marc programu se koristi električna kontaktna provodljivost umesto kontaktnog otpora. Međutim, provodljivost električnog kontakta je recipročna vrednost električnog otpora. U većini slučajeva otpor električnog kontakta je 30 puta veći od otpora električnog materijala. Otpori električnog materijala i kontakta značajno zavise od temperature. Pored toga, električni otpor kontakta zavisi od pritiska kontakta. Tokom postupka zavarivanja otpor električnog kontakta se brzo smanjuje, dok se otpor električnog materijala povećava. Slika 14. prikazuje krive otpora električnog materijala, otpora električnog kontakta i ukupnog otpora sistema tokom postupka tačkastog zavarivanja:



**Figure 14. Time curves for electrical resistances during spot welding process**  
**Slika 14. Vremenske krive za električni otpor tokom procesa tačkastog zavarivanja**

**4.3 Tensile test in experiment**

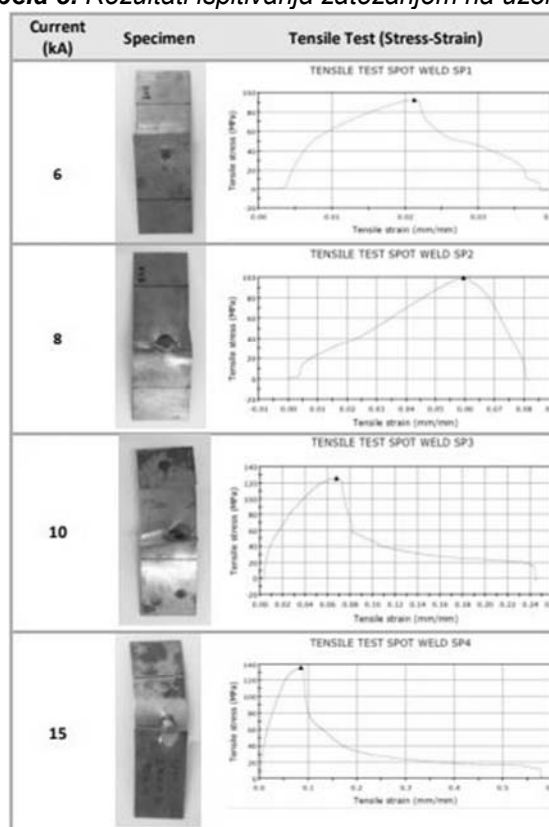
Experiment process was conducted simultaneously with the simulation. Specimens were spot welded according to selected parameters followed with tensile shear test to obtain the results. Tab. 3 below shows the results of the tensile shear test. The specimen with highest Ultimate Tensile Strength (UTS) is with optimum weld current parameter for the spot welding process.

**4.3 Eksperimentalno određivanje zatezne čvrstoće**

Eksperimenta je izveden istovremeno sa simulacijom. Uzorci su tačkasto zavareni prema odabranim parametrima, praćeni ispitivanjem smicajnim zatezanjem. Tabela 3 prikazuje rezultate ispitivanja smicajnog zatezanja. Uzorak sa najvećom zateznom čvrstoćom ima optimalni parametar struje zavarivanja tokom postupka tačkastog zavarivanja.



**Table 3. Tensile test result on the specimen**  
**Tabela 3. Rezultati ispitivanja zatezanjem na uzorcima**



**Table 4. Tensile test stress at maximum load**  
**Tabela 4. Zatezna čvrstoća pri maksimalnom opterećenju**

Welding current Struja zavarivanja (kA)	Tensile stress at max. load Zatezna čvrstoća pri max. opterećenju (MPa)	Load Opterećenje (N)
6	511.520	6,427.946
8	565.103	7,101.078
10	617.593	7,760.669
15	735.592	9,243.723
Min.	511.520	6,427.946
Max.	735.592	9,243.723

From the Tab. 4 above, the maximum tensile stress which was recorded at 735.592 MPa and the maximum load is 9,243.723 N which is for 15 kA of weld current while the minimum tensile stress is 511.520 MPa and minimum load is 6,427.946 N of 6 kA. Thus, the highest maximum load recorded is obtained from the weld current of 15 kA.

#### 4.4 User Subroutine and tensile test in simulation

Prior to running the simulation, load cases have to be created in order for the defined job parameter to

Iz Tabele 4, maksimalna zatezna čvrstoća je zabeleženo na 735.592 MPa, a maksimalno opterećenje je 9.243.723 N, što odgovara intezitetu struje zavarivanja od 15 kA, dok je minimalna zatezna čvrstoća 511.520 MPa, a minimalno opterećenje 6.427.946 N za 6 kA. Dakle, najveće zabeleženo maksimalno opterećenje dobija se kod struje zavarivanja od 15 kA

#### 4.4 Podprogram korisnika i ispitivanje zatezanjem pri simulaciji

Pre izvođenja simulacije, načini opterećenja moraju se formirati kako bi se definisali parametri koji će se primeniti. Izračena su tri slučaja opterećenja koja



be applied. 3 load cases were created which consists of welding, cooling and tensile test.

Fig. 15(a) shows the contact condition between each of the components, top electrode, top sheet, bottom sheet and bottom electrode. Each of the components must be in contact to each other to ensure the activation of contact resistance and allow sufficient of heat to be generated when the weld current is applied during the welding process. Electric potential result as shown in Fig. 15(b) indicates the current flow through the top electrode, specimen and bottom electrode. The point current was applied at the top surface of the top electrode while zero voltage is set at the lower surface of the bottom electrode.

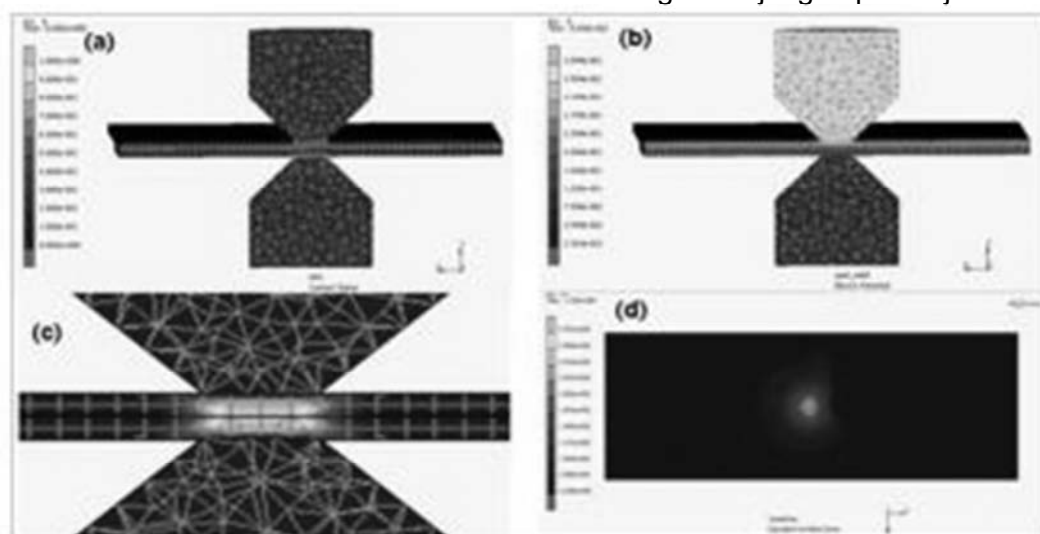
Fig. 15(c) The grey color region shows the nugget formation during the resistance spot welding process. The peak temperature is also used to define the fusion zone with application of UACT GLUE user subroutine. Glue deactivation will be activated to all the selected nodes between the two sheets except the nodes that reach the predefined glued temperature.

Fig. 15(d) shows the application of tensile load after the welding and cooling process. High stress region was observed after tensile shear load is applied.

se sastoje od zavarivanja, hlađenja i ispitivanja zatezanjem.

Slika 15(a) prikazuje stanje kontakta između svake od komponenata, gornje elektrode, gornje ploče, donje ploče i donje elektrode. Svaka od komponenata mora biti u međusobnom kontaktu, kako bi se osiguralo aktiviranje otpora kontakta i omogućilo stvaranje dovoljne toplote tokom postupka zavarivanja dok se primenjuje struja zavarivanja. Rezultat električnog potencijala, kao što je prikazano na slici 15(b) ukazuje na protok struje kroz gornju elektrodu, uzorak i donju elektrodu. Ciljana struja primenjena je na gornjoj površini gornje elektrode, dok je nulti napon podešen na donjoj površini donje elektrode.

Na slici 15(c) oblast sive boje pokazuje stvaranje vara tokom procesa tačkastog zavarivanja. Vršna temperatura se takođe koristila za definisanje zone stapanja primenom korisničkog potprograma UACT GLUE. Glue deaktivacija je aktivirana na svim izabranim nodalnim čvorovima između dve ploče, osim na nodalnim čvorovima koji dostignu unapred definisanu temperature spajanja. Slika 15(d) prikazuje primenu zateznog opterećenja nakon završetka procesa zavarivanja i hlađenja. Područje visokih naprezanja primećeno je nakon primene zateznog smicajnog naprezanja.

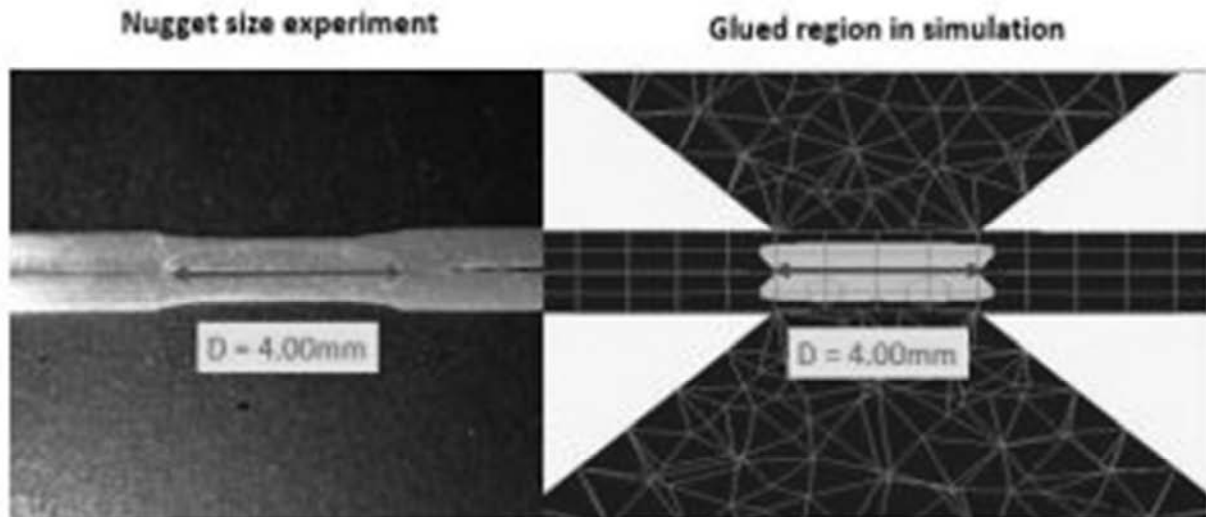


**Figure 15.** (a) Contact status, (b) Electric potential (c) weld nugget, (d) Equivalent von-mises stress regio

**Slika 15.** (a) Status kontakata, (b) električni potencijal, (c) sočivast zavareni spoj, (d) Ekvivalent oblasti naprezanja

As the material melting temperature in simulation may vary compared with the actual experiment, nugget size formed in the experiment will be used as reference to determine acceptable temperature to define the glued region of spot welded joint in simulation. This reverse process is practical to analyze the differences between experimental and simulation. The measurement of the weld nugget is shown in Fig. 16 below.

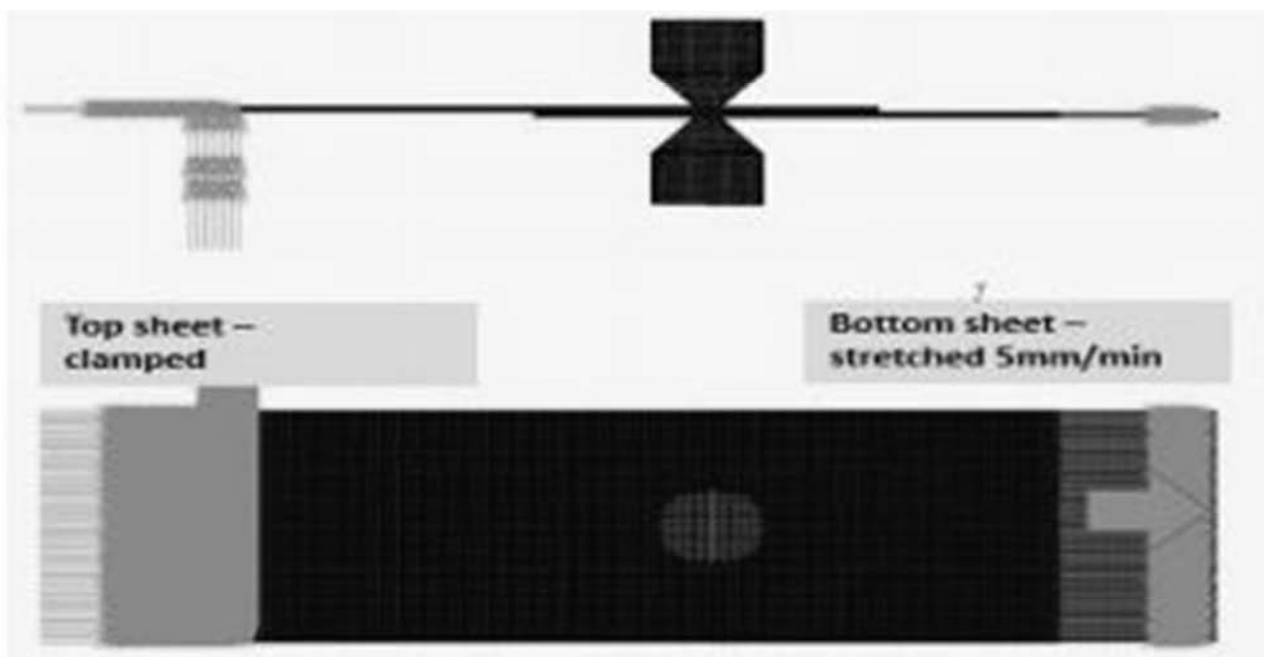
Kako se temperatura topljenja materijala u simulaciji može razlikovati u poređenju sa stvarnim eksperimentom, veličina zavarenog spoja formirana u eksperimentu koristiće se kao referenca za određivanje prihvatljive temperature za definisanje spojenog područja tačkasto zavarenog spoja u simulaciji. Ovaj obrnuti postupak je praktičan za analizu razlika između eksperimentalnih i simuliranih rezultata. Merenje zavarenog spoja je prikazano je na Slici 16.



**Figure 16.** Nugget size measurement  
**Slika 16.** Merenje veličine sočivastog zavarenog spoja

The temperature was observed at 800°C for 4 mm weld nugget diameter to be formed at the contact surface. Through this information, the glued region temperature was set >800°C in the subroutine.

Konstatovana je temperatura od 800°C za prečnik spoja od 4 mm koji se formira na kontaktnoj površini. Na osnovu ove informacije u potprogramu je podešena temperature radnog područja > 800°C.



**Figure 17.** Tensile modelling in simulation  
**Slika 17.** Modeliranje zatezanja pri simulaciji

Fig. 17 above shows the tensile shear test which has been modelled in the simulation. To set up the test, one of the sheet is clamped by applying fix displacement in x,y,z axis and the other sheet is subjected to contact clamp velocity of 5 mm/min. Fig. 18 below shows the result of tensile test for one of the specimens in experiment compared with simulation. Under tensile shear load, both specimen in experiment and model in simulation was observed experienced bending at the region

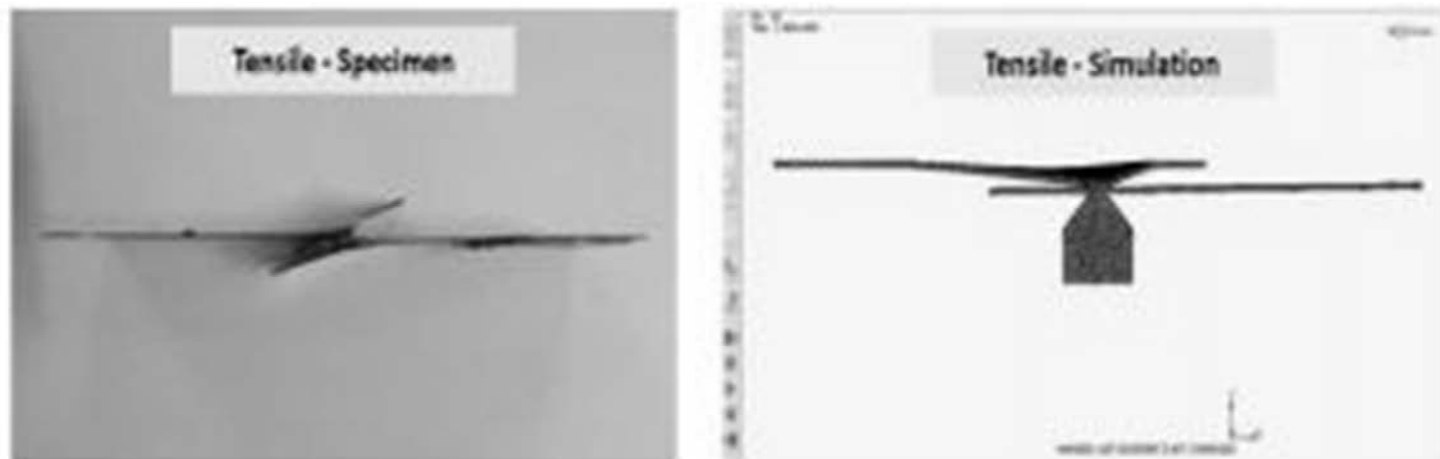
Slika 17 prikazuje test smicajnog zatezanja koji je modelovan pri simulaciji. Da bi se postavio test, jedna od ploča se fiksira u x,y,z osama, a druga ploča je podvrgnuta pomeranju kontaktne stezaljke brzinom od 5 mm/min.

Slika 18 prikazuje rezultat poređenja ispitivanja zatezanjem i simulacijom za jedan od uzoraka. Pod opterećenjem smicajnim zatezanjem, primećeno je da su oba uzorka, i u eksperimentu i u simulaciji, pretrpeli savijanje u predelu blizu vara. Međutim,



close to the weld nugget. However, deformation profile for each of the specimen may vary subjected to the parameter applied and condition prior to the tensile i.e. residual stress or distortion may exist after the spot welding process.

profil deformacije za svaki uzorak može se razlikovati u zavisnosti od primenjenog parametra i stanja pre napreznja, odnosno mogu postojati zaostala napreznja ili izobličenja nakon postupka tačkastog zavarivanja.



**Figure 18.** Result of tensile test of specimen vs simulation

**Slika 18.** Rezultati zateznih ispitivanja uzoraka i simulacije

## 5. Conclusion

This study is focusing on analysis of resistance spot welding by simulation to be validated through experimental approach. Tensile shear test is a well known characteristics to determine the tensile strength of material especially in a spot welded joint. Same process parameters were applied in the simulation to study the differences with experiment result. The result obtained satisfies early theoretical assumption that certain process parameter such as weld current, contact condition and boundary condition were highly influential. However, further study is required to establish deeper understanding on the effect of each process parameter to the strength of the spot welded joint as follows:

- Developing clearer scope of damage criteria to be applied in simulation to achieve result similar with experimental approach.
- Application of scanning electron microscope (SEM) to obtain a fuller apprehension of the phases of the welded zone and development of the weld nugget.
- Analyzing the thermal and phase transformation of RSW

## 5. Zaključak

Ova studija je fokusirana na analizu elektrootpornog tačkastog zavarivanja simulacijom, koja je potvrđena eksperimentalnim pristupkom. Ispitivanje smicajnim zatezanjem je dobro poznata metoda određivanja zatezne čvrstoće materijala, posebno u tačkasto zavarenom spoju. Isti procesni parametri su primenjeni u simulaciji, radi proučavanja razlika sa eksperimentalnim rezultatima. Dobijeni rezultati zadovoljavaju prvobitnu teorijsku pretpostavku da su određeni procesni parametri veoma značajni, kao što su struja zavarivanja, kontaktni uslovi i granični uslovi. Međutim, potrebna su dalja proučavanja kako bi se utvrdilo dublje razumevanje uticaja svakog procesnog parametra na čvrstoću tačkasto zavarenog spoja i to:

- Razvijanje jasnijeg kritičnog nivoa, koji će se primeniti u simulaciji, kako bi se postigao rezultat sličan eksperimentalnom pristupu.
- Primena skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM), za postizanje potpunijeg razumevanja postojećih faza u zavarenoj zoni i razvoj sočivastog zavarenog spoja.
- Analiza toplotnih i faznih transformacije pri elektrootpornom tačkastom zavarivanju.



## Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to staff member of Research Interest Group: Advanced Manufacturing Technology and Advanced Manufacturing Technology Excellence Centre at Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA (UiTM) for encouraging this research. This research and conference participation is also financially supported by ASEANUNET grant with the project number ASEANUNET/2019/Montan/1.

## References

- [1] Joel Andersson, Jonatan Deleskog, Fatigue Life and Stiffness of the Spider Spot Weld Model, Master's thesis, ISSN 1652-8557, 2014:22
- [2] Ario Sunar Baskoro, M. Rizky Trianda, Jos Istiyanto, Sugeng Supriyadi, Danardono A. Sumarsono, Gandjar Kiswanto, Effects of Welding Time and Welding Current to Weld Nugget and Shear Load on Electrical Resistance Spot Welding of Cold Rolled Sheet for Body Construction, 2014 IEEE International Conference.
- [3] Sachin Patil, Hamid Lankarani, Characterization and Simplified Modeling of the Failure Behavior of Spot Welds from Extra-High Strength Steels for Crash Simulation, Volume 16 Issue 4 Version 1.0, Year 2016
- [4] László Prém, Zoltán Bézi and András Balogh, Development of Complex Spot Welding Technologies for Automotive DP Steels with FEM Support, DOI 10.1007/978-3-319-51189-4\_36, Springer International Publishing AG 2017
- [5] Szabolcs Szávai, Zoltán Bézi, Experimental and numerical analysis of resistance spot welded joints on DP600 sheets, January 2014
- [6] Aditya S. Kulkarni, Dr. K. H. Inamdar, Effect of Process Parameters on Resistance Welding, April 2015, Volume 2, Issue 4
- [7] Miller Technical Handbook for Resistance Spot Welding, 2012-003 335D
- [8] Ikram Ali, M.I Khan, K.M.Moeed, Comparative Study of Spot Welding Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of ASS 304 and ASS 202 Steel, Vol. 3, Issue 1, pp: (35-39), 2015
- [9] Kamran Rasheed, M.I.Khan, "A Review on different optimization techniques used to optimize the process parameters of resistance spot welding", International Journal of Engineering Technology, Management, and Applied Sciences, page 2, October 2014, Volume 2 Issue 5, ISSN 2349-4476.

## Zahvalnica

Autori žele da izraze zahvalnost članu istraživačke grupe: Napredne proizvodne tehnologije i Centar izvrsnosti napredne proizvodne tehnologije na Mašinskom fakultetu Univerziteta Tehnologije MARA (UiTM) na podsticanju ovog istraživanja. Ovo istraživanje i učešće na konferencijama takođe finansijski podržava ASEANUNET grant sa brojem projekta ASEANUNET/2019/Montan/1

- [10] Zoha Nasir, Dr.M.I.Khan "Resistance spot welding and optimization techniques used to optimize its process parameters", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).
- [11] Sun, D., Zhang, Y., Liu, Y., Gu, X., & Li, H. (2016). Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes. *JMADE*, 109, 596–608.
- [12] Dickinson, D. W, Franklin, J. E. and Stanya, A. Characterization of spot welding behavior of dynamic electrical parameter monitoring. *Weld. J.*, 1980,59 (6), 170s-176s.
- [13] P. G. Hodge, Jr."A General Theory of Piecewise Linear Plasticity Based on Maximum Shear" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1057, Vol. 5, pp. 242 to 260.
- [14] Okerblom, H.O., "calculations of Deformations of Welded Structures, MASHGIZ, Moscow, 1955.
- [15] M. Eshraghi, M.A. Tschopp, M.A. Zaeem, S.D. Felicelli. "Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: A parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis", *Materials and Design* (2014) Vol. 56, pp. 387- 397.
- [16] Y. P. Yang, S. S. Babu, F. Orth, W. Peterson "Integrated computational model to predict mechanical behavior of spot weld", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008 Vol. 13 No. 3.
- [17] Gerhardt RA. "Impedance Spectroscopy and Mobility Spectra" *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. London: Elsevier; 2005. p. 350-63.
- [18] AWS. Standard test method AWS D8.9M (Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials). 2012.
- [19] Lebbal Habib, Ziadi Abdelkader, Berrekia Habib, Boukhoulda Farouk Benallel "Experimental Study of Tensile Test in Resistance Spot Welding Process", *Latin American Journals of Solids and Structures*.



# WELD-ING DOO

INŽENJERING U ZAVARIVANJU – ENGINEERING IN THE WELDING

11210 Beograd, Zage Malivuk 45, Tel: 011/2717-320, Tel/Fax: 011/2717-384, 011/6303-415, 063/ 8019-608, 063/ 8844-633,  
APR: BD 101775/ 2009, Mat. Br. 20550368, Rač. br. 205-147340-97, PIB: 106181399, PDV: 498047436  
E-mail: weldingdoo@gmail.com, www.weld-ing.com

Poštovane kolege i čitaoci ,

Veliko mi je zadovoljstvo i privilegija da vas obavestim da preduzeće Weld-Ing doo postoji i uspešno posluje skoro dvanaest godina kao jedna od vodećih obrazovnih, sertifikacionih i izvođačkih kuća iz oblasti zavarivanja u Srbiji.

Izuzetno mi je drago što nam ukazujete poverenje svih ovih godina i što ste prepoznali našu posvećenost svakom klijentu i kvalitetu izvršenih usluga.

Iskreno se nadam se da ćemo uz vašu podršku na obostrano zadovoljstvo nastaviti da pomeramo granice, istražujemo nove oblasti i da ćemo ostati vaš pouzdan partner u godinama pred nama.

Hvala vam što zajedno sa nama postajete deo dobre tradicije, a tradicija je lepota koja se neguje i čuva.

DIREKTOR



Vladan Macanković, ing.maš.EWE,IWI

Dokument se ne sme umnožavati bez saglasnosti WELD-ING-a



PREDUZEĆE ZA INŽENJERING, KONSALTING, MONTAŽU, ODRŽAVANJE, OBUKU I CERTIFIKACIJU OSOBA  
COMPANY FOR ENGINEERING, CONSULTING, MONTAGE, SERVICE, TRAINING AND CERTIFICATION OF PERSONS





Raghawendra Pratap Singh Sisodia<sup>1</sup>, Judit Kovács<sup>2</sup>

## **Comparative HAZ softening analysis of three different automotive aluminium alloys by physical simulation**

### **Komparativna analiza fizičkom simulacijom omekšavanja ZUTa tri različite aluminijumske legure za vozila**

#### **Originalni naučni rad / Original scientific paper**

*Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019*

#### **Rad primljen / Paper received:**

Januar 2021.

**Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović**

**Ključne reči:** Karakterizacija ZUT, Gleeble 3500 termofizički simulator, aluminijumske legure za vozila, AA5754-H22, AA6082-T6, AA7075-T6, Rykalin-2D model.

#### **Abstract**

The development of high strength aluminium alloy has revolutionized the automotive industry with innovative manufacturing and technological process to provide high performance components, weight reduction and also diversified the application field and design consideration for the automotive parts that work under severe conditions, but the selection of proper production parameters is most challenging task to get excellent results. Growing industrial demand of aluminium alloys led to the development new welding technologies, processes and studies of various parameters effects for its intended purposes. The microstructural changes that lead to loss of hardening and thereby mechanical strength in the HAZ welded joint even though the base materials are heat treatable and precipitation hardened. So, our goal is to analyse HAZ softening and analyse the sub zones as a function of parameter. In this paper, the influence of weld heat cycle on heat affected zone (HAZ) is physically simulated for Tungsten Inert Gas Welding (TIG) using Gleeble 3500 thermomechanical simulator for three different automotive aluminium alloy (AA5754-H22, AA6082-T6 & AA7075-T6) plate of 1 mm thickness. In order to simulate the sub-zones of the heat-affected zone, samples were heated to four different HAZ peak temperatures (550 °C, 440 °C, 380 °C and 280 °C), two linear heat input (100 J/mm and 200 J/mm) by the application of Rykalin 2D model. A series of experiments were performed to understand the behaviour, which make it possible to measure the objective data on the basis of the obtained image of the aluminium alloys tested with

#### **Adresa autora / Author's address:**

*Faculty of Mechanical Engineering & Informatics, Institute of Materials Science and Materials Technology, University of Miskolc, Miskolc, Hungary*

<sup>1</sup>ametraghu@uni-miskolc.hu

<sup>2</sup>bjudit.kovacs19940303@gmail.com

**Keywords:** HAZ characterization, Gleeble 3500 thermophysical simulator, automotive aluminium alloys AA5754-H22, AA6082-T6, AA7075-T6, Rykalin-2D model.

#### **Rezime**

Razvoj aluminijumskih legura visoke čvrstoće je uveo revoluciju u automobilsku industriju, kroz inovativne izrade i tehnološke procese, a sve u cilju obezbeđivanja komponenti visokih performansi, smanjenja težine, različitih primena i konstrukcija za automobilske delove koji funkcionišu pod teškim uslovima. Međutim izbor preciznih proizvodnih parametara predstavlja najveći izazov da bi se ostvarili najbolji rezultati. Rastući industrijski zahtevi za aluminijumskim legurama vodi ka razvoju novih tehnologija zavarivanja, zatim procesa kao i odgovarajućih studija koje izučavaju efekte uticaja različitih parametara. Mikrostrukturalne promene dovode do gubitka tvrdoće, a time i mehaničke čvrstoće u zoni uticaja toplote (ZUT) zavarenih spojeva bez obzira što je osnovni metal termički obradljiv i precipitaciono ojačan. Cilj ovog rada je da analizira omekšavanje ZUTa i subzona u zavisnosti od primenjenih parametara. Izvršeno je ispitivanje uticaja toplotnog ciklusa zavarivanja na zonu uticaja toplote (ZUT) fizičkom simulacijom za slučaj zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog gasa (TIG), a primenom termomehaničkog simulatora Gleeble 3500. Ispitivanja su vršena na tri različite aluminijumske legure za primenu u vozilima (AA5754-H22, AA6082-T6 i AA7075-T6), u obliku ploča debljina 1mm. U cilju simulacija subzona u zoni uticaja toplote, uzorci su zagrevani do četiri različite maksimalne - vršne temperature karakteristične za ZUT (550 °C, 440 °C, 380 °C i 280 °C) i sa dva različita linearna unosa toplote (100 J/mm i 200 J/mm) koji su u skladu sa primenjenim 2D Rykalin-ovim modelom prenosa



heat-affected zone tests in a Gleeble 3500 physical simulator. The main objective is to achieve the weldability of three different automotive aluminium alloys and their comparison based on the welding parameters like heat input. Further, the investigation of HAZ softening and microstructure of the specimens were tested and analysed using Vicker's hardness test and optical microscope respectively. The paper focuses on HAZ softening analysis of different grades of aluminium alloys for automotive application.

## 1. Introduction

Keeping in view the environmental changes that have taken place in recent years and the changing consumer requirements, there is a growing need for research into lightweight structural materials. Such changing consumer requirements include, for example, improved fuel efficiency, reduction of exhaust emissions, and increased operational efficiency in various transport applications. Also, increasingly stringent environmental regulations have fundamentally influenced the development of automotive materials and technologies [1]. One way of satisfying this endeavour is to reduce emissions of pollutants by reducing vehicle weight. Due to this, in the last few years, the use of aluminium alloys in vehicles shows an unprecedented increase compared to all other applications. Aluminium alloys have great potential for mass reduction, because of their low density, with a high strength and toughness comparable to steel by the application of alloying elements. Another remarkable feature of aluminium is that it can be recycled under excellent conditions. A wide variety of alloys are available for the production of welded structures and finished products made using aluminium and its alloys. Each of the alloys and alloy types have different properties that are important to both the designer and the manufacturer. The practical marking system used by Aluminium Association (AA), which groups the alloys according to their main alloying elements, was taken over by EN 573. The marking system denotes the alloys with a four-digit numerical sign, in the main alloy grouping [2] as shown in Fig. 1.

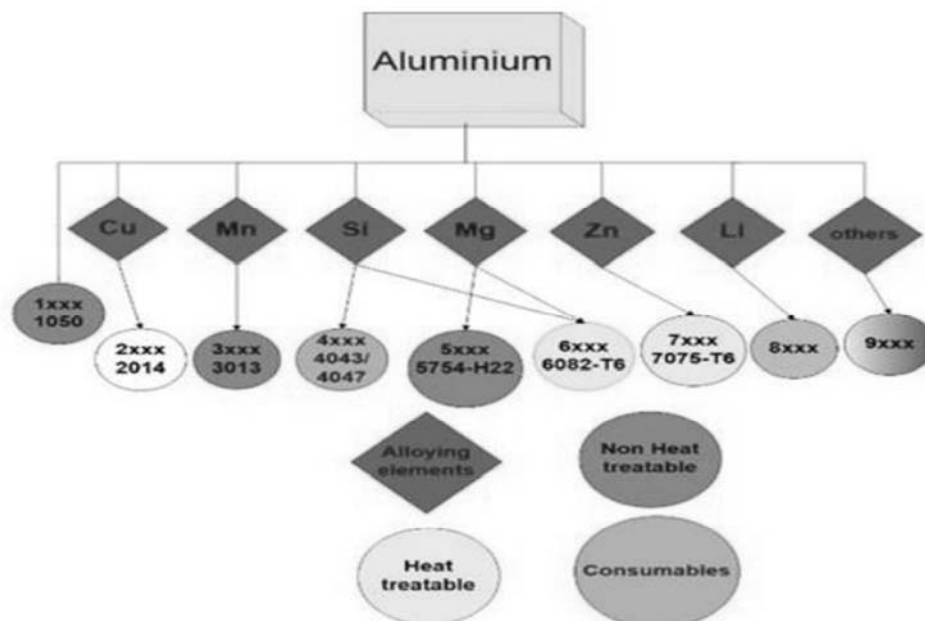
toplote. Izvršena je serija eksperimenata, da bi se razumelo ponašanje metala, na osnovu čega je moguće meriti objektivne podatke o aluminijumskim legurama koje su testirane na Gleeble 3500 fizičkom simulatoru, a pod uslovima koji postoje u ZUTu. Glavni cilj istraživanja je određivanje zavarljivosti tri različite aluminijumske legure za vozila i njihovo poređenje na osnovu parametara zavarivanja, kao što je u ovom slučaju unos toplote. Pored toga, ispitivanje omekšavanja ZUTa i promene u mikrostrukturi je ispitivano i analizirano primenom Vikers uređaja za merenje tvrdoće i optičkom mikroskopijom. Rad je fokusiran na analizu omekšavanja ZUTa za različite kvalitete aluminijumskih legura za primenu u automobilskoj industriji.

## 1. Uvod

Imajući u vidu promene životne sredine koje su se dogodile zadnjih godina i promena zahteva potrošača, raste potreba za istraživanjem u oblasti lakih konstrukcionih materijala. Takve promene zahteva potrošača uključuju na primer smanjenje potrošnje goriva, smanjenje emisije izduvnih gasova i povećanu operativnost za različite vrste transporta. Takođe sve strožiji ekološki propisi značajno utiču na razvoj materijala i tehnologija za vozila [1]. Jedan od načina za zadovoljavanje ovih zahteva je smanjenje zagađenja kroz smanjenje težine vozila. Zbog ovih zahteva zadnjih nekoliko godina, primena aluminijumskih legura u vozilima pokazuje izuzetno visoko povećanje u poređenju sa svim ostalim primenama.

Aluminijumske legure imaju veliki potencijal za smanjenje težine, zbog svoje male gustine, visoke čvrstoće i žilavosti u pređenju sa legiranim čelicima. Druga značajna prednost aluminijuma je da može da se reciklira u visokom procentu.

Široki spektar legura zasnovanih na aluminijumu i aluminijumskim legurama se primenjuju za izradu zavarenih konstrukcija i gotovih proizvoda. Svaka od legura i tipa legura ima različite osobine, koje su značajne za projektante i proizvođače. Praktičan sistem označavanja Al legura koji koristi Aluminium Association (AA), grupiše legure prema njihovim glavnim legirajućim elementima, što je preuzeo i standard EN 573. Legure se označavaju sa četvorocifrenom numeričkom oznakom u glavne grupe legura [2], kao što je prikazano na Slici 1.



**Figure 1.** Grouping of aluminium alloy [3]

**Slika 1.** Grupe alumijumskih legura [3]

The formability of modern aluminium materials in the automotive industry is fundamentally impaired by the alloys found in them and by the brittle dispersions resulting from them [4]. The reduction in formability is such that there is already a risk of cracking during the shaping of parts with simple geometric design, as well as a high degree of shrinkage [5].

The aims of this paper to conduct a series of experiments and understand the behaviours which make it possible to measure the objective data based on the obtained results of the aluminium alloys tested with heat-affected zone tests in a physical simulator. The main objective is to achieve the weldability of three different automotive aluminium alloys and their comparison based on the welding parameters like heat input. Further, the investigation of HAZ softening and microstructure of the specimens were tested and analysed using Vicker's hardness test and optical microscope respectively. The paper focuses on HAZ softening analysis of three different automotive aluminium alloy (AA5754-H22, AA6082-T6 & AA7075-T6).

## 2. Aluminium alloys & weldability

Aluminium has a density of approximately one third compared to steel and is used in applications where a high strength/weight ratio is required [6]. Aluminium components can be joined by several different methods, including welding, brazing, soldering, adhesive bonding, and mechanical methods such as riveting and bolting [7]. The welding processes preferred more as compared to other process to join aluminium products, as it can

Plastičnost modernih aluminijskih legura u automobilske industriji je značajno smanjena legirajućim elementima u njima i njihovim krtnim uključcima [4]. Smanjenje plastičnosti je takva da postoji rizik stvaranja prslina za vreme oblikovanja u jednostavne geometrijske oblike, kao i visok stepen skupljanja [5].

Cilj ovog rada je izvođenje serije eksperimenata na fizičkom simulatoru, da bi se razjasnilo ponašanje materijala - aluminijskih legura u zoni uticaja toplote pri zavarivanju i da se mere objektivni podaci dobijeni na osnovu ispitivanja. Glavni cilj je postizanje dobre zavarljivosti tri različite aluminijske legure za vozila i njihovo poređenje zasnovano na parametrima zavarivanja, kao što je unos toplote. Pored toga, ispitivanje omekšavanje ZUTa i mikrostruktura uzoraka, koje je ispitivano i analizirano primenom merenja Vickers tvrdoće i primenom optičke mikroskopije. Rad se fokusirao na analizu omekšavanja ZUTa za tri različite aluminijske legure za vozila (AA5754-H22, AA6082-T6 i AA7075-T6).

## 2. Aluminijske legure i zavarljivost

Aluminijum ima gustinu koja je jedna trećina gustine čelika i primenjuje se tamo gde se zahteva visok odnos čvrstoće i težine [6]. Aluminijske komponente se mogu spajati na nekoliko različitih načina, uključujući zavarivanje, lemljenje, tvrdo lemljenje, adhezivno spajanje i mehaničke metode, kao što su zakivanje i spajanje vijcima [7]. Proces zavarivanja je u prednosti u odnosu na druge procese spajanja kod aluminijskih proizvoda,



provide high productivity, weld quality, welding speed, manufacturing flexibility, and easy automation [8, 9]. Rather metallurgical, challenge in aluminium welding is the occurrence of hot cracks during solidification. The susceptibility to solidification cracking defines the weldability of an aluminium alloy and depends upon the alloy system, the welding conditions and the weld geometry [7, 10]. In some alloys, this effect is so severe that welding without cracking cannot be obtained [7]. Unfortunately, this concerns many high-strength Al alloys (5xxx and 6xxx alloys). For this reason, an important way to increase the weldability of crack-sensitive Al alloys is the use of a filler material with a different composition and shorter solidification interval. In this way, the weld metal chemical composition and freezing range is shifted away from the crack-sensitive range [11].

If we consider the typical strength distribution in the cross section of the fusion welded joint of different kind of aluminium alloys, we can see that a significant strength reduction happens in the weld and HAZ of heat treatable aluminium alloys. However, in case of solid-state pressure welding the softening is lower compared to fusion welding [12]. The wrought base metals used were Alloy AA 5754 (AlMg3), known for applications in the automotive industry and for hermetic housings in the electronic industry. AA 5754 is an aluminium magnesium alloy, and the most prominent feature is the high resistance to oxidation and corrosion. Thus, it has been extensively used in pressure vessels, tanks, trucks, and shipbuilding. The 6082-T6 alloy is designating as a 6xxx-series of aluminium which have Mg and Si as the main alloying elements. Due to its high resistance to stress corrosion cracking it is often used as construction material for several components in automotive industry, plant construction and shipbuilding [13]. These alloys can be anodized, which may be necessary for products where hard, high-strength, corrosion-resistant surfaces are important. In hard anodized condition, they are ideal for braking systems, electronic valves and pistons [2]. A further important influence on cracking behaviour is the chemical composition of the base metal. The alloy 6082 (AlSi1MgMn) has a higher susceptibility to solidification cracking than other Al-Mg-Si alloys, which is known from ring casting tests for a wide range of Al-Mg-Si alloys [14]. Reasons are the Mg (0.75 wt. %) and Si (0.86 wt. %) concentration of the alloy that explain the high susceptibility [9]. In addition, the composition and distribution of the interdendritic liquid influence strongly the tendency for solidification cracking,

obzirom da on obezbeđuje visoku produktivnost, kvalitetan spoj, veliku brzinu spajanja, proizvodnu fleksibilnost i laku automatizaciju procesa [8, 9]. Pri zavarivanju aluminijuma postoje metalurški izazovi, kao što je pojava toplih prslina za vreme očvršćavanja. Osetljivost na pojavu prslina usled očvršćavanja definiše zavarljivost aluminijumskih legura i zavisi od sistema legiranja, uslova zavarivanja i geometrije spoja [7, 10]. Kod nekih legura, taj efekat je toliko izražen da zavarivanje bez prisustva prslina se ne može ostvariti [7]. Nažalost ovo se javlja kod mnogih Al legura visoke čvrstoće (legure 5xxx i 6xxx). Iz tog razloga, jedan od važnih načina da se poveća zavarljivost Al legura je upotreba dodatnog materijala drugačijeg hemijskog sastava i primena kraćeg intervala očvršćavanja. Na taj način, hemijskim sastavom metala šava i intervalom očvršćavanja se vrši pomeranje iz oblasti osetljivosti na pojavu prslina [11].

Ako se posmatra karakteristična raspodela čvrstoće u poprečnom preseku zavarenog spoja različitih aluminijumskih legura, može se uočiti značajno smanjenje čvrstoće u spoju i ZUTu termički obradljivih aluminijumskih legura. Međutim u slučaju zavarivanja u čvrstom stanju pod pritiskom, omekšavanje je manje u odnosu na zavarivanje topljenjem [12].

Od legura za plastičnu preradu koristi se legura AA 5754 (AlMg3), poznata za primenu u automobilske industriji i za hermetička kućišta u industriji elektronike. Aluminijum - magnezijum legura AA 5754 ima izrazito visoku otpornost ka oksidaciji i koroziji. Ona se primenjuje za sudove pod pritiskom, rezervoare, vozila i za izradu plovila.

Legura 6082-T6 iz serije aluminijumskih legura 6xxx ima glavne legirajuće elemente Mg i Si. Zbog njene visoke otpornosti na naponsku koroziju često se koristi kao konstrukcioni material za različite komponente u auto industriji, izradu postrojenja i za izradu plovila [13]. Ove legure mogu da se anodiziraju, naročito kada je potrebna, visoke čvrstoće i na koroziju otporna površina. U čvrsto anodiziranom stanju idealna je za kočione sisteme, elektronske ventile i klipove [2]. Takođe važan uticaj na ponašanje prema pojavi prslina, je hemijski sastav osnovnog metala. Legura 6082 (AlSi1MgMn) ima veću osetljivost na pojavu prslina pri očvršćavanju nego druge Al-Mg-Si legure [14]. Razlog je prisustvo Mg (0.75 zapr. %) i Si (0.86 zapr. %) u leguri, što objašnjava njihovu visoku osetljivost [9]. Pored toga sastav i raspodela međudendritnog rastopa pri očvršćavanju jako utiče na tendenciju stvaranja prslina umajući u vidu da su prslina usled očvršćavanja obično rezultat cepanja



taking into account that solidification cracking usually results from a tearing of the interdendritic, liquid film of the remaining melt [13].

Aluminium alloy 7075 is a heat treatable aluminium alloy based on Al-Mg-Zn system. It provides a good strength and toughness after the precipitation hardening heat treatment (solution heat treatment, followed by the rapid quenching and then artificial ageing) because of the high alloy content (5-6 wt % Zn, 2-3 wt % Mg and 1-2 wt % Cu) [7]. 7075 (AlZn5.5MgCu) is an aluminium alloy with zinc as the primary alloying element (according to EN 485-2 standard) [7]. The severe HAZ softening, the cracking in the weld and the material loss by vaporisation are the major problems encountered in the 7075-aluminium alloy during fusion welding. Among other problems, the high crack susceptibility and degradation of properties in the heat affected zone (HAZ) often occur in either fusion welding (electric arc and laser welding for example) or in friction stir welding [15-16]. The 7075 aluminium alloys are used in various auto bodies because of its high specific strength, low quench sensitivity, wide range of solution heat treatment temperatures and rapid natural aging characteristics. The 7075 aluminium alloys are used in body panels, brake housings, brake pistons, air deflector parts, and seat slides [17]. Rajkumar et al. [18] report that the welding of AA 7075 by fusion welding causes solidification cracking at the heat affected zone due to presence of copper [19]. Furthermore, oxidation and/or vaporization of zinc during the welding revealed many defects such as porosity, lack-of-fusion, and hazardous fumes.

The remarkable positive property of this aluminium alloy is the self-hardening effect thanks to the supersaturated solid solution after air cooling (the solid solution is supersaturated even in slow cooling), then the natural ageing can occur in a couple of months. This characteristic can be advantageous in terms of the production of welded structures, since the acceptable strength can be partially realized without post weld ageing, however this alloy tends to intergranular corrosion [20]. This new generation of aluminium alloys is widely used in luxury cars (frame structure, brake housing, spoilers etc.) due to their comparative strength to medium strength steels. In Fig. 2 the high strength aluminium alloys in a car-body of a sport car are marked by blue colour.

međudendritnog, tečnog filma zaostalog rastopa [13].

Legura aluminijuma 7075 je termički obradljiva aluminijumska legura zasnovana na sistemu Al-Mg-Zn. Ona obezbeđuje dobru čvrstoću i žilavost posle termičkog tretmana - precipitacionog ojačavanja (žarenje praćeno brzim kaljenjem i zatim veštačkim starenjem), naročito zbog visokog sadržaja legirajućih elemenata (5-6 zapr. % Zn, 2-3 zapr. % Mg i 1-2 zapr. % Cu) [7]. Legura aluminijuma 7075 (AlZn5.5MgCu) prema standard EN 485-2 je primarno legirana cinkom [7]. Izrazito omekšavanje ZUTa, prsline u metalu šava i gubitak materijala usled isparavanja su glavni problemi koji se javljaju u aluminijumskoj leguri 7075 tokom zavarivanja topljenjem. Pored ostalog, visoka osetljivost na prsline i degradacija osobina u zoni uticaja toplote (ZUT) se često javljaju pri zavarivanju topljenjem, kao što su elektrolučno ili lasersko zavarivanje ili zavarivanje trenjem sa mešanjem [15-16]. Aluminijumska legura 7075 se primenjuje za izradu vozila zbog njene visoke specifične čvrstoće, male osetljivosti na zakaljivanje i širokog opsega temperatura žarenja i karakteristike brzog prirodnog starenja. Legura se koristi za panele karoserije vozila, kućišta kočnica, kočione klipove, delove usmerivača vazduha i klizače za sedišta [17]. Rajkumar i dr. [18] su pokazali da zavarivanje topljenjem legure AA7075 izaziva prsline usled očvršćavanja u zoni uticaja toplote zbog prisustva bakra [19]. Takođe oksidacija i/ili isparavanje cinka za vreme zavarivanja izaziva mnoge greške kao što je poroznost, neprovar i oslobađa pri zavarivanju otrovna isparenja.

Značajna pozitivna osobina ovih aluminijumskih legura je efekat samoojačavanja zahvaljujući stvaranju prezasićenog čvrstog rastvora posle hlađenja na vazduhu (čvrsti rastvor je prezasićen čak i pri sporom hlađenju), tako da se prirodno starenje obavlja tokom nekoliko meseci. Ova karakteristika predstavlja prednost pri proizvodnji zavarenih konstrukcija, pri čemu se prihvatljiva čvrstoća može delimično postići bez starenja posle zavarivanja, međutim ova legura ima tendenciju intergranularne korozije [20].

Ova nova generacija aluminijumskih legura se široko primenjuje kod luksuznih kola (konstrukcija rama, kličesta kočnica, spojleri i dr.) zbog njihove čvrstoće koja je uporedljiva sa čvrstoćom srednje čvrstih čelika. Na Slici 2 prikazana je primena aluminijumskih legura visoke čvrstoće za izradu delova karoserija sportskih kola i označeni su svetlo sivom bojom.



**Figure 2.** High strength aluminium alloys in a sport car-body [21]

**Slika 2.** Aluminijumske legure visoke čvrstoće u karoserijama sportskih automobila [21]

### 3. Experimental plan

The increasing utilization of aluminium alloys can be originated to their low density, good heat and electric conductivity

#### 3.1 Investigated material

The material investigated was a commercial 5754-H22, 6082-T6 with a thickness of 1 mm & 7075-T6 with a thickness of 1.5 mm and the sheet were cut in the rolling direction. Since the experimental 7075-T6 alloy under development by the material producer and it has not been available in the market yet, just the typical chemical composition and mechanical properties are presented. The chemical composition and mechanical properties of these aluminium alloys are shown in Tab. 1 and Tab. 2 respectively. The chemical composition of the investigated aluminium alloys in mass percent is summarized in Table 1.

**Table 1.** Typical chemical composition of aluminium alloy (wt%)  
**Tabela 1.** Karakteristični hemijski sastav aluminijumskih legura (zapr. %)

Al alloys	Cu	Fe	Mn	Cr	Mg	Ti	Si	Zn	Al
5754-H22	0.05	0.29	0.35	0.009	2.79	0.016	0.19	0.03	Bal.
6082-T6	0.09	0.46	0.40	0.02	0.70	0.03	0.90	0.08	Bal.
7075- T6	1.2-2.0	≤0.5	≤0.3	0.18-0.28	2.1-2.9	≤0.2	0.4	5.1-6.1	Bal.

The typical mechanical properties of aluminium alloys are presented in Tab. 2.

### 3. Eksperimentalni plan

Povećana primena aluminijumskih legura proističe iz njihove male gustine, dobre toplotne i električne provodljivosti.

#### 3.1 Ispitivani materijal

Materijal za ispitivanje je bio komercijalna legura 5754-H22, 6082-T6, debljine 1 mm i legura 7075-T6 debljine 1.5 mm u obliku traka koje su isečene u pravcu valjanja. Pošto je eksperimentalna legura 7075-T6 još uvek u razvoju kod proizvođača i nije još uvek na tržištu, prikazani su tipičan hemijski sastav i mehaničke osobine. Hemijski sastav i mehaničke osobine ovih aluminijumskih legura su prikazani u Tabelama 1 i 2. Hemijski sastav u masenim procentima prikazan je u Tabeli 1.

Mehaničke osobine aluminijumskih legura prikazane su u Tabeli 2.

**Table 2.** Typical mechanical properties of aluminium alloy  
**Tabela 2.** Karakteristične mehaničke osobine aluminijumskih legura

Al alloys	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p0.2</sub> , MPa	A <sub>50</sub> , %	HV <sub>0.2</sub>
5754-H22	220	137	22	71
6082-T6	280	315	12	107
7075-T6	572	513	14	180



### 3.2 Physical simulation

During the planning of the experiments our aim was to analyse the heat-affected zone (HAZ) in terms of softening during Gas Tungsten Arc Welding. To investigate the weldability of 5754-H22, 6082-T6, 7075-T6 aluminium alloys, tests were designed to simulate the material properties at different peak temperatures using the Gleeble 3500 simulator. The Gleeble recreates specific sections of the HAZ based on the programmed thermal cycle [22]. HAZ properties can be limitedly analysed by conventional material tests, therefore physical simulators (i.e. Gleeble) were developed for the examination of different HAZ areas [23,24-25]. During the experimental work, HAZ tests have been performed in a new generation thermophysical simulator, called Gleeble 3500, installed in the Institute of Materials Science and Technology of the University of Miskolc as shown in Fig. 3.

### 3.2 Fizička simulacija

Planiranje eksperimenata imalo je za cilj da analizira zonu uticaja toplote (ZUT) i njeno omekšavanje za vreme elektrolučnog zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa volframovom elektrodom. Da bi se ispitala zavarljivost aluminijumskih legura 5754-H22, 6082-T6 i 7075-T6, ispitivanja su osmišljena da simuliraju osobine materijala na različitim vršnim temperaturama primenom Gleeble 3500 simulatora. Uređaj Gleeble menja pojedine delove ZUTa na osnovu programiranog termalnog ciklusa [22]. Osobine ZUTa mogu ograničeno da se analiziraju klasičnim ispitivanjima materijala, što je razlog razvoja fizičkih simulatora (na pr. Gleeble) za ispitivanje različitih oblasti ZUTa [23, 24-25]. Tokom eksperimentalnog rada, ispitivanja ZUTa vršena su na novoj generaciji termofizičkih simulatora, nazvanih Gleeble 3500 (Slika 3), koji je instaliran na Institutu za nauku o materijalima i tehnologijama Univerziteta u Miskolcu.



**Figure 3.** Gleeble 3500 simulator system  
**Slika 3.** Sistem simulatora Gleeble 3500

Due to its direct resistance heating system the achievable heating rate can be as high as 10 000 °C/s, whilst the cooling rate can be similarly high. Although it must be remarked that the heating and cooling rate are always the function of specimen size and shape, and in many cases external cooling is needed for the desired cooling rate.

### 3.3 Heat source model

In the Quicksim software developed for Gleeble programming the possible HAZ simulation welding heat cycle models are F (s, d) thermocouple measurement or FEM, Hannerz, Rykalin-2D, Rykalin-3D, Rosenthal, Exponential. But in this paper, heat cycles were determined according to the Rykalin 2D model by considering the 1 mm & 1.5 mm sheet thickness. This model describes the temperature field generated by a moving spot-like heat source on the surface of a semi infinity body. In the sheet metals the characteristic roll of heat

Zbog direktnog otpornog sistema zagrevanja, može se ostvariti brzina zagrevanja do 10.000 °C/s, dok brzina hlađenja može biti takođe velika. Mora se naglasiti da brzine zagrevanja i hlađenja su uvek u funkciji veličine i oblika uzorka i često je potrebno spoljnje hlađenje da bi se ostvarila željena brzina hlađenja.

### 3.3 Model izvora toplote

Za simulacije ZUTa razvijen je softver Quicksim za programiranje uređaja Gleeble. Modeli toplotnog ciklusa izvora toplote, mogu biti F(s,d) zasnovani na merenjima termoparovima ili proračunima metodom FEM, zatim modelima Hannerz-a, Rykalina 2D, Rykalina 3D, Rosenthal-a i eksponencialni. U ovom radu za toplotni ciklus definisan je Rykalin-ovim 2D modelom i razmatrana je traka debljine 1 mm i 1.5 mm. Po ovom modelu temperaturno polje se generiše kretanjem toplotnog izvora u obliku tačke na površini polubeskonačnog



conduction disappears and the roll of convection is getting more important due to the larger surface to volume ratio. By the application of Rykalin 2D model the time-temperature points of HAZ heat cycle can be calculated as follows (QuikSim™ Software) [26]:

$$T - T_0 = \frac{a}{\sqrt{b * (t - t_0)}} \exp\left(\frac{c}{t - t_0}\right) \quad (1)$$

$$a = \frac{Q}{d} \quad (2)$$

$$b = 4\pi * k * c * \rho \quad (3)$$

$$c = -\frac{r^2}{4k / (c\rho)} \quad (4)$$

$$Q = \sqrt{\frac{4\pi k c \rho \Delta t}{1/(T_2 - T_0)^2 - 1/(T_1 - T_0)^2}} * d \quad (5)$$

Where:

$Q$  = energy input, J/cm;

$c$  = specific heat, J/g/°C;

$r$  = density; g/cm<sup>3</sup>;

$k$  = thermal conductivity, W/cm/°C;

$d$  = plate thickness, cm;

$T_1, T_2$  = temperature used to define cooling time, °C;

$t_0$  = time at the end of preheating, s; and

$\Delta t$  = cooling time from  $T_2$  to  $T_1$ , s.

Gde su:

$Q$  = unos toplote, J/cm;

$c$  = specifična toplota, J/g/°C;

$r$  = gustina; g/cm<sup>3</sup>;

$k$  = termalna provodljivost, W/cm/°C;

$d$  = debljina ploče, cm;

$T_1, T_2$  = temperature primenjene da se definiše vreme hlađenja, °C;

$t_0$  = vreme na kraju predgrevanja, s; i

$\Delta t$  = vreme hlađenja od  $T_2$  do  $T_1$ , s.

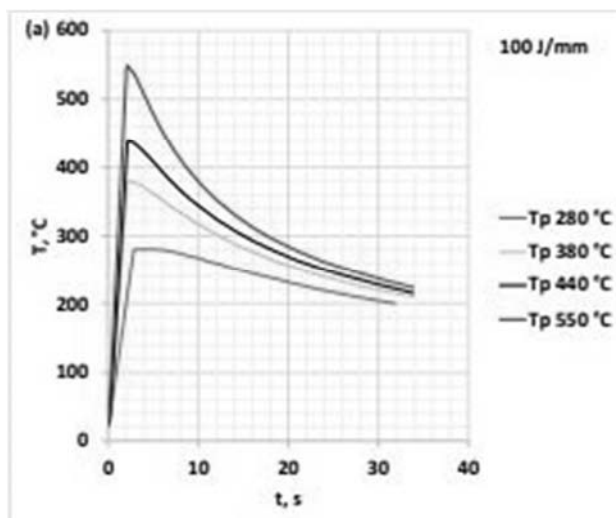
### 3.4 HAZ thermal cycles

By the application of HAZ test in Gleeble the desired HAZ subzone can be precisely and homogeneously created in a volume sufficient for the further material tests. The Rykalin-2D model, implemented to the GSI software of Gleeble, was used for the determination of HAZ thermal cycle by considering the 1 mm & 1.5 mm sheet thickness. The heating rate, holding time, cooling time of the thermal cycle parameters were automatically adjusted according to the given plate thickness, energy input and possible procedures during the tungsten inert gas welding. The thermophysical properties of the given alloy were used for the model. Four HAZ peak temperatures were selected in the function of the distance from the fusion line. Two linear heat input values (100 and 200 J/mm) were selected in order to simulate a low and a high heat input welding at the given sheet thickness and welding technology. The desired subzones were simulated on 4-4 samples. The programmed thermal cycles of the different HAZ subzones are illustrated in Fig. 4 and 5.

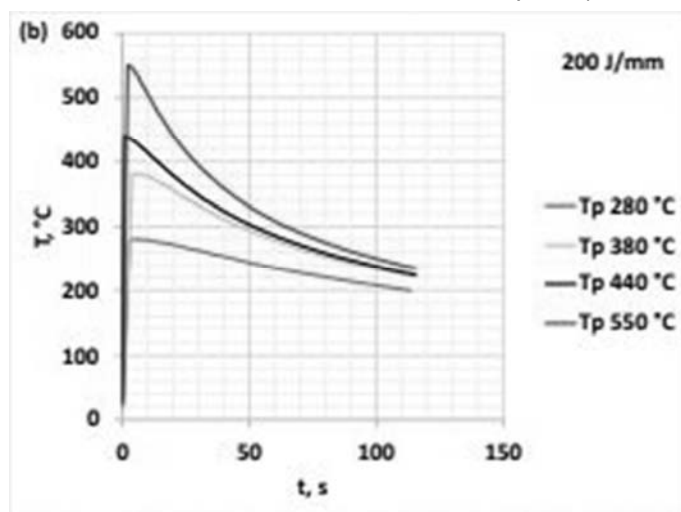
tela. U simuliranoj metalnoj traci karakteristični udeo provođenja toplote se zanemaruje, a udeo toplote zračenja postaje značajan zbog većeg odnosa površina prema zapremini zamišljenog tela koje se zavaruje. Primenom Rikalin 2D modela u tačkama u ZUTu kao i toplotni ciklus u njima, prikazan je kroz zavisnost vreme-temperatura i može se proračunati na sledeći način QuikSim™ softverom [26]:

### 3.4 Termalni ciklus ZUTa

Primenom ispitivanja na Gleeble, željene subzone u ZUTu mogu se precizno i ravnomerno stvoriti u zapremini dovoljnoj za dalja ispitivanja materijala. Rikalin - ov 2D model, implementiran u GSI softver za Gleeble uređaj, je primenjen za određivanje termalnog ciklusa ZUTa, ramatrajući trake debljina 1 mm i 1.5 mm. Parametri termalnog ciklusa kao što su: brzina zagrevanja, vreme zadržavanja, vreme hlađenja su automatski podešavani u skladu sa debljinom ispitivane trake, unosom energije i mogućim procedurama karakterističnim za TIG zavarivanje. Termofizičke osobine ispitivanih legura su korišćene u modelu. Četiri vršnih – maksimalnih temperatura u ZUTu su izabrane u zavisnosti od rastojanja od linije spoja. Dve vrednosti unosa toplote (100 i 200 J/mm) su izabrane u cilju simulacije niskog i visokog unosa toplote za zavarivanje ispitivane debljine trake i izabrane tehnologije zavarivanja. Planirane simulacije subzona su vršene na 4-4 uzorka. Programirani termalni ciklus različitih subzona ZUTa su ilustrovane na Slikama 4 i 5.



**Figure 4.** HAZ thermal cycles at low heat input (100 J/mm)  
**Slika 4.** ZUT termalni ciklus za nizak unos toplote (100 J/mm)



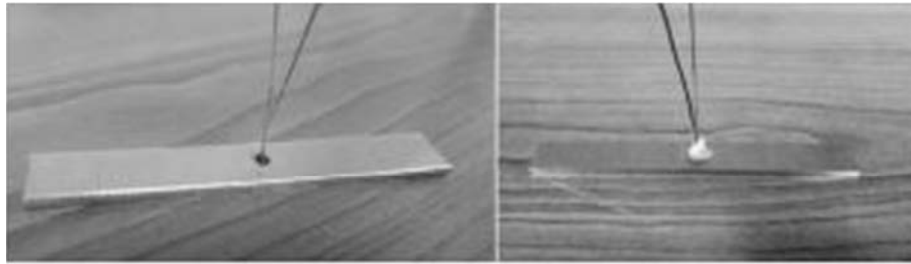
**Figure 5.** HAZ thermal cycles at high heat input (200 J/mm)  
**Slika 5.** ZUT termalni ciklus za visok unos toplote (200 J/mm)

### 3.5 Experimental circumstances

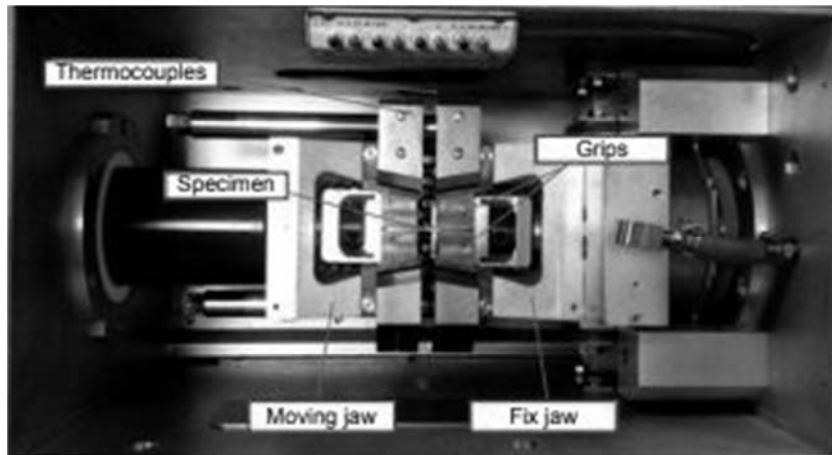
The aluminium sheet which are used for thermomechanical testing using Gleeble 3500 simulator are short samples. A precise preparation of HAZ specimen with required geometrical shape and good surface quality is indispensable for the successful simulation. A K(NiCr-Ni) type thermocouple was welded onto the middle of sample for temperature record. During those simulations when the maximal temperature was higher than 450 °C there was a risk of the failure of thermocouples at the contacting points to the specimens. Therefore, the joints were protected by cement according to the recommendations of Gleeble manual. In Fig. 6 the applied specimens (70x10x1 mm) & (70x10x1.5 mm) are presented (left: without cement, right: with cement), whilst in Fig. 7 the test specimen is shown in the test (vacuum) chamber.

### 3.5 Eksperimentalni detalji

Aluminijumske trake koje su korišćene za termomehanička ispitivanja primenom Gleeble 3500 simulatora su kratki uzorci. Precizna priprema ZUT uzoraka sa zahtevanim geometrijskim oblikom i dobrom kvalitetom površine su neizostavni za uspešnu simulaciju. Termopar tipa K(NiCr-Ni) za beleženje temperatura je zavaren na sredini uzorka. Za vreme izvođenja simulacija, kada su temperature više od 450 °C, postojao je rizik kvara termopara na kontaktnoj površini uzorka. Zato su spojevi zaštićeni cementom, u skladu sa uputstvom za uređaj Gleeble. Na Slici 6. prikazani su uzorci za ispitivanje, levo bez zaštite kontakta cementom, a desno sa cementnom zaštitom. Na Slici 7. prikazan je ispitni uzorak u ispitnoj (vacuum) komori.



**Figure 6.** Specimens for the physical simulations  
**Slika 6.** Uzorci za fizičku simulaciju



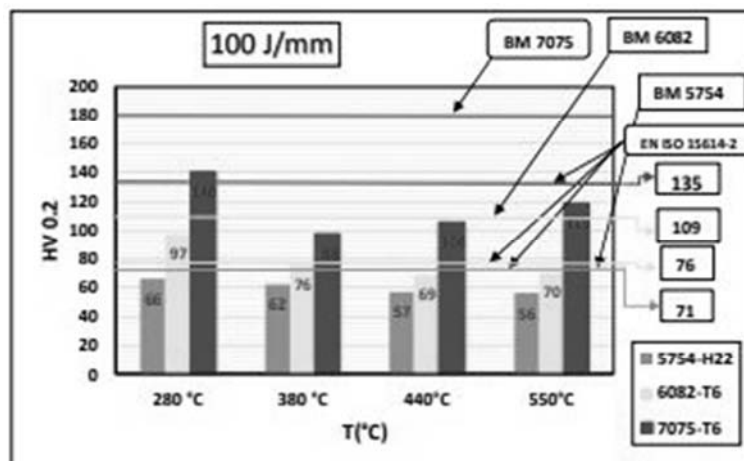
**Figure 7.** Specimen in the test chamber  
**Slika 7.** Uzorak u ispitnoj komori

**4. Characterization of HAZ softening**

The desired HAZ areas (550 °C, 440 °C, 380 °C, 280 °C) were successfully simulated for two relevant linear heat input values during the experiments. After the successful simulations the specimens were perpendicularly cut at thermocouples and hardness test were elaborated. The results of Vickers hardness test, which was performed by a Mitutoyo MVK-H1 microhardness tester with HV0.2 load, are summarized in Fig. 8 and Fig. 9.

**4. Karakterizacija omekšavanja ZUTa**

Planirane oblasti ZUTa (550 °C, 440 °C, 380 °C, 280 °C) su uspešno simulirane tokom eksperimenta, za dve vrednosti unosa toplote. Posle uspešne simulacije uzorci su poprečno odsečeni na mestima termoparova i izvršena su ispitivnja tvrdoća. Rezultati ispitivanja Vickers tvrdoće, koji su izvršeni na uređaju za ispitivanje mikrotvrdoće Mitutoyo MVK-H1, sa opterećenjem od HV0.2 su prikazani na Slikama 8 i 9.



**Figure 8.** Hardness distribution in HAZ at different linear heat inputs  
**Slika 8.** Raspodela tvrdoća u ZUTu za različite unose toplote



Although according to the governing standard for the qualification of welding procedure (EN ISO 15614-2) there is not any requirement for the maximum or minimum hardness of the aluminium welded joint, the strength level can be characterized by the hardness, since there is a correlation between the hardness and the strength.

Standardom za kvalifikaciju procedura zavarivanja (EN ISO 15614-2), nisu definisani zahtevi za najveću ili najnižu tvrdoću zavarenih spojeva aluminijuma. Nivo čvrstoće može se orediti na osnovu tvrdoće, obzirom da postoji korelacija između tvrdoće i čvrstoće.

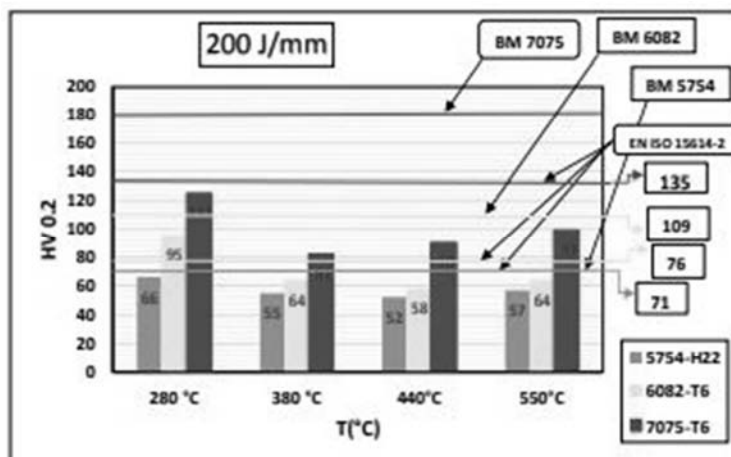


Figure 9. Hardness distribution in HAZ at different linear heat inputs

Slika 9. Raspodela tvrdoća u ZUTu za različite unose toplote

The examined AA5754-H22, AA6082-T6 & AA7075-T6 aluminium alloy belongs to the 22.3, 23.1 & 23.2 group respectively of CR ISO 15608, which means that the requirement for the tensile strength of the welded joint is the 100%, 70% & 75% respectively of the base material according to EN ISO 15614-2. If we consider the same requirement for the HAZ hardness compared to the base material, the hardness should reach 71 HV0.2, 76 HV0.2 & 135 HV0.2 in HAZ when the 5754-H22, 6082-T6 & 7075-T6 base material has 71 HV0.2, 109 HV0.2 & 180 HV0.2 respectively.

It can be seen from HAZ simulation results that for 5754-H22 aluminium alloy with the increase of the linear heat input the hardness of the heat affect zone has decreased further in the case of the transversally tested specimens. Using 100 J/mm linear heat input, test specimens with slightly higher hardness were obtained than with linear heat input of 200 J/mm. However, the difference between the test pieces tested with the same peak temperature simulation is minimal. Basically, with the use of both linear heat input, the simulated peak temperature 440 °C was the most critical, while the most favourable values were produced with the peak temperature 280 °C. In both cases, the hardness of the 280 °C peak temperature thermal cycle was at a level of compliance of 90%, significantly closer to the original hardness of the base material, but in other cases it was not achieved. All simulated sub zone hardness is below the prescribed limit according to EN ISO 15614-2.

Ispitivane legure AA5754-H22, AA6082-T6 i AA7075-T6 pripadaju grupi 22.3, 23.1 i 23.2 prema standardu CR ISO 15608, što znači da zahtevi za zateznom čvrstoćom zavarenih spojeva su 100%, 70% i 75% od osnovnog materijala, a u skladu sa standardom EN ISO 15614-2. Ako se posmatraju isti zahtevi za tvrdoćama u ZUTu, u poređenju sa osnovnim materijalom dobijaju se vrednosti od : 71 HV0.2, 76 HV0.2 i 135 HV0.2 u ZUTu dok osnovni material legura 5754-H22, 6082-T6 i 7075-T6 ima vrednosti tvrdoća od: 71 HV0.2, 109 HV0.2 i 180 HV0.2.

Iz rezultata simulacije ZUTa za aluminijumsku leguru 5754-H22 se može videti da sa povećanjem linearnog unosa toplote, tvrdoća zone uticaja toplote opada i u slučaju uzdužno ispitivanih uzoraka. Primena linearnog unosa toplote od 100 J/mm, dobijeni su uzorci sa nezatno višom tvrdoćom nego sa linearnim unosom toplote od 200 J/mm. Međutim, minimalna je razlika između uzoraka ispitnih na istoj vršnoj temperaturi. U osnovi, primenom oba linearna unosa toplote, simulirana vršna temperatura od 440 °C je najkritičnija, dok su najpovoljnije vrednosti dobijene sa vršnom temperaturom od 280 °C. U oba slučaja tvrdoća dobijena termalnim ciklusom na temperaturi od 280 °C je na nivou od oko 90%, što je značajno bliže originalnoj tvrdoći osnovnog materijala, ali u drugim slučajevima nije dostignuto. Tvrdoće svih simuliranih subzona su ispod zahtevanih prema standardu EN ISO 15614-2.



In case of 6082-T6 aluminium alloy, sub zones have always been softened by the applied linear heat input, and with the increase of linear heat input, the hardness of the heat affected zone has further decreased. However, in different zones heated to different temperatures there was a markedly different degree of softening. In addition, the positive conclusion is that the hardness of the examined peak temperatures in three cases reached the hardness expected by the standard, and two times exceeded the 90% of the requirement value. Compared to the results of the 5754-H22, it can be clearly established that the aluminium alloy 6082-T6 reacts more favourably to the linear heat inputs of the different peak temperature simulated zone. The reduction in hardness of the 6082-T6 aluminium alloy is due to the deterioration in the quality of the constituents originally present in the base material. This negative change can be due to over-regeneration, which occurs in zones that are too high at peak temperatures and cause precipitation to develop. Thus, the hardness distribution of the heat affect zone depends on the interaction between solubility and recrystallization.

It can be clearly seen from simulated 7075-T6 aluminium alloy, welding has significantly softened it. The hardness following the simulation, with one exception, is below the standard hardness. In terms of linear heat input, it can be clearly established that the 100 J/mm linear heat input is more favourable than 200 J/mm in terms of maintaining the strength properties. By the increase of the linear heat input the hardness distribution was even lower. However, using higher linear heat input makes the process more productive. The amount of softening was the most critical at the 380 °C peak temperature subzone.

It can be concluded that the hardness was lower almost in all peak temperatures and heat inputs. However, it can be important to note that the total strength of the welded joint is not only determined by the strength of the weakest point, since the width of softened zones should be also considered.

#### 4.1 Materials tests

Optical microscopic tests were performed in 200x magnification by a Zeiss Axio Observer D1m. The samples were etched by Barker-etching (5 g HBF<sub>4</sub> + 200 ml water) which is recommended for aluminium alloys. During this process an oxide layer forms on the surface. This optically active oxide forms with diverse speed on the different orientation grains, therefore by the application of polarized light the grains have different colour in the

U slučaju aluminijumske legure 6082-T6, subzone su omekšale za svaki od unosa toplote i sa povećanjem linearnog unosa toplote tvrdoća zone uticaja toplote je i dalje omekšavala. Međutim, u različitim zonama koje su zagrevane do različitim temperatura, dešavao se različit stepen omekšavanja. Kao pozitivan zaključak može se reći da tvrdoća za ispitivane vršne temperature su u tri slučaja postigle vrednosti u skladu sa standardom, a u dva slučaja pokazuju 90 % od zahtevanih vrednosti. Poredeći sa rezultatima legure 5754-H22 može se ustanoviti da aluminijumska legura 6082-T6 reaguje mnogo povoljnije na linearni unos toplote za različite vršne temperature u simuliranoj zoni. Smanjenje tvrdoće aluminijumske legure 6082-T6 se dešava zbog snižavanja kvaliteta mikrokonstituenata koji su primarno prisutni u osnovnom materijalu. Ove negativne promene mogu nastati zbog ponovne regeneracije, koja se dešava u zonama koje su na visokim temperaturama i omogućavaju proces taloženja. Na osnovu toga, raspodela tvrdoća u zoni uticaja toplote zavisi od međudejstva između rastvorljivosti i rekristalizacije.

Iz simulacije aluminijumske legure 7075-T6 može se jasno videti da je zavarivanje značajno omekšava. Tvrdoća je nakon simulacije, sa jednim izuzetkom, ispod standardnih vrednosti za tvrdoću. Razmatrajući linearni unos toplote, može se jasno utvrditi da je unos toplote od 100 J/mm mnogo povoljniji nego unos od 200 J/mm za održanje nivoa osobina čvrstoće. Povećanjem unosa toplote, raspodela tvrdoće je čak niža. Međutim, primena većeg linearnog unosa toplote čini proces mnogo produktivnijim. Udeo omekšavanja je najkritičniji na vršnoj temperaturi od 380 °C.

Može se zaključiti da je tvrdoća bila niža za skoro sve vršne temperature i unose toplote. Međutim, važno je napomenuti da ukupna čvrstoća zavarenog spoja nije samo određena čvrstoćom najslabijih tačaka, obzirom da bi trebalo da se uzme u obzir širina omekšale zone.

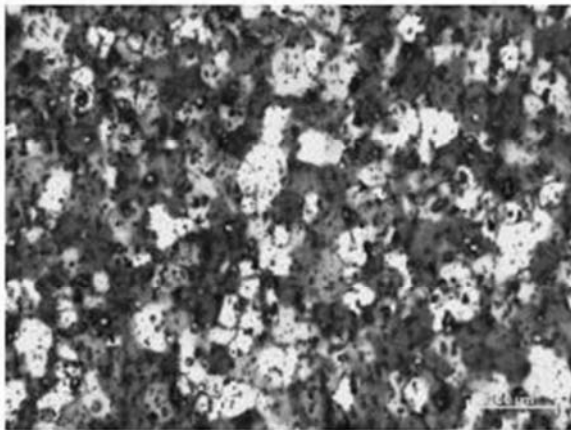
#### 4.1 Ispitvanje materijala

Mikroskopska ispitivanja vršena su na optičkom mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m, pri uvećanju 200 puta. Uzorci su nagrizeni u rastvoru Barker (5 g HBF<sub>4</sub> + 200 ml vode), koji je preporučen za aluminijumske legure. Za vreme ovog procesa oksidni film se formira na površini. Ovaj optički aktivan oksidni sloj formira se različitim brzinama na različito orjentisanim zrnima, tako da primenom polarizovanog svetla zrna imaju različitu boju u zavisnosti od njihove orijentacije.

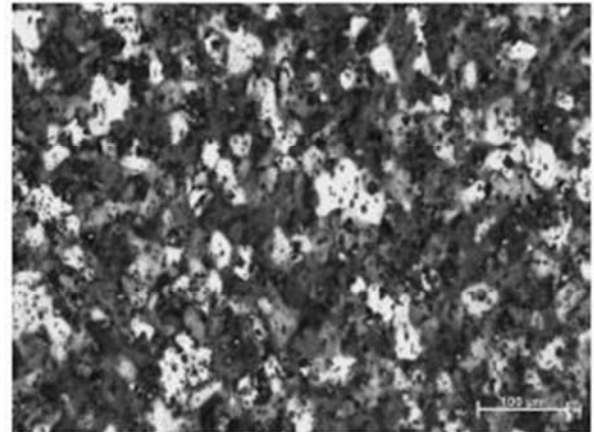


function of their orientation. The grain structure of the investigated subzone for AA5754-H22, AA6082-T6 & AA7075-T6 aluminium alloys at the different peak temperatures (550 °C, 440 °C, 380 °C, 280 °C) and linear heat input 200 J/mm were illustrated in Fig. 10a,b,c-d, Fig. 11a,b,c-d and Fig. 12a,b,c-d respectively at M=200x. In Figure 10a, we can see that grains are spherical and bigger and getting refined at lower peak temperature (Figure 10d) thus imparting high hardness compared to other peak temperatures. Similarly, in case of Fig. 11a and 11c have identical microstructure and giving the same hardness but in Fig. 11b grains are broader and also this simulated zone (T=280 °C) observed as more critical. In the Fig. 12d, can be observed as very fine, elongated grains thus at the peak temperature of 280 °C has highest hardness as compared to others which can be correlated to this figure.

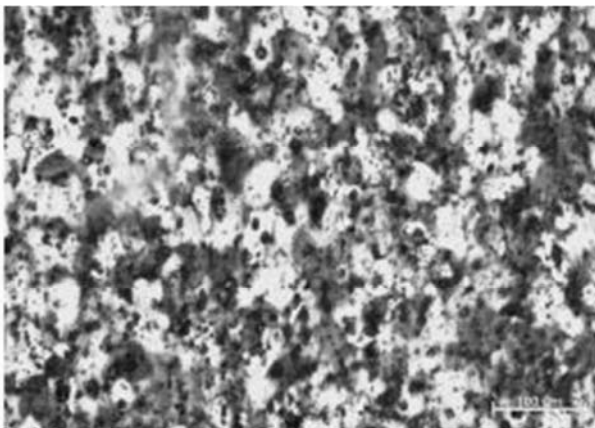
Mikrostrukture ispitivanih subzona za aluminijumske legure AA5754-H22, AA6082-T6 i AA7075-T6, za različite vršne temperature (550 °C, 440 °C, 380 °C, 280 °C) i linearni unos toplote od 200 J/mm, su prikazane na Slikama 10a,b,c-d, Slikama 11a,b,c-d i Slikama 12a,b,c-d, pri uvećanju od 200 puta. Na slici 10a se može videti da su zrna sferična i veća i postaju rafinisanija na nižim vršnim temperaturama (Slika 10d), tako da daju visoku tvrdoću u poređenju sa ostalim vršnim temperaturama. Slično u slučaju na Slikama 11a i 11c prikazuju se identične mikrostrukture i koje daju istu tvrdoću. Na Slici 11b zrna su šira i za tu simuliranu zonu (T=280 °C) je primećeno da je mnogo kritičnija. Na Slici 12d, mogu se videti vrlo fina, izdužena zrna, tako da na vršnoj temperaturi od 280 °C, imaju najvišu tvrdoću u poređenju sa drugim koje se mogu uporediti sa ovom slikom.



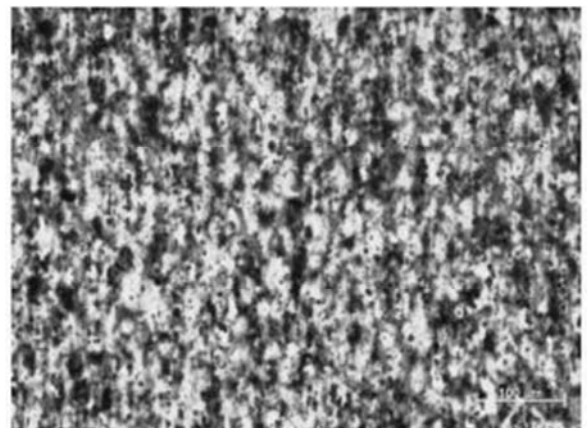
**Figure 10 (a)** T= 550 °C, Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 10 (a)** T= 550 °C, Linearni unos toplote 200 J/mm



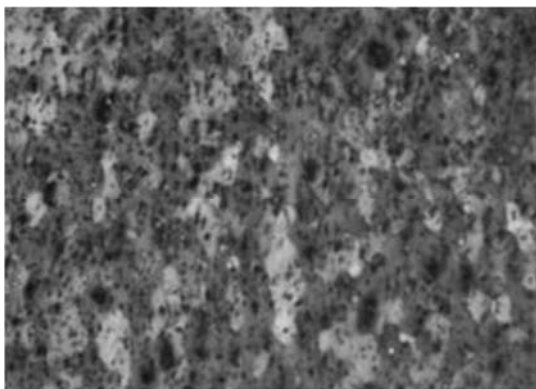
**Figure 10 (b)** T= 440 °C, Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 10 (b)** T= 440 °C, Linearni unos toplote 200 J/mm



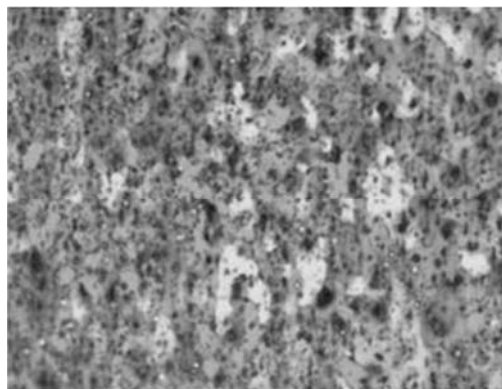
**Figure 10 (c)** T= 380 °C, Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 10 (c)** T= 380 °C, Linearni unos toplote 200 J/mm



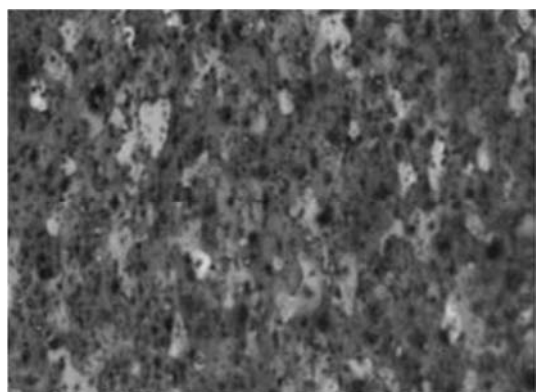
**Figure 10 (d)** T= 280 °C, Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 10 (d)** T= 280 °C, Linearni unos toplote 200 J/mm



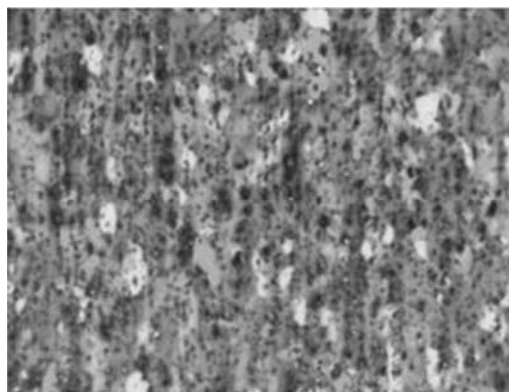
**Figure 11 (a)**  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 11 (a)**  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



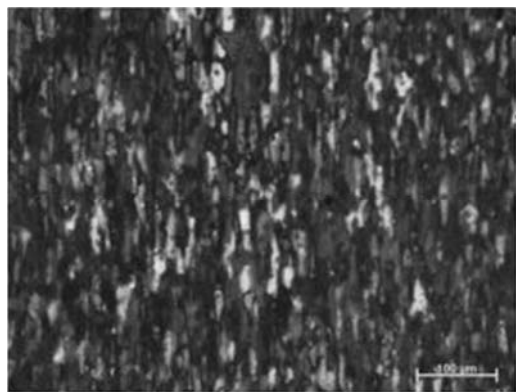
**Figure 11 (b)**  $T= 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 11 (b)**  $T= 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



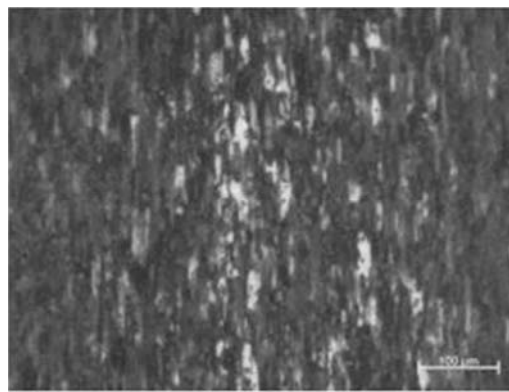
**Figure 11 (c)**  $T= 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 11(c)**  $T= 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



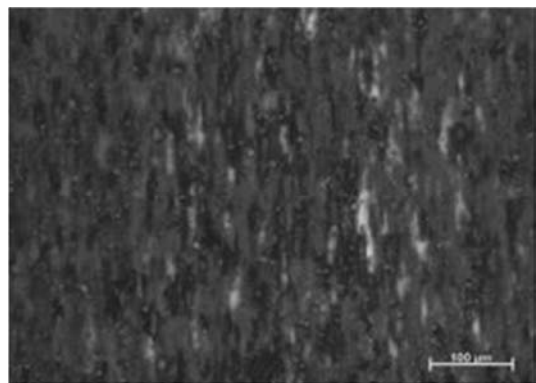
**Figure 11 (d)**  $T= 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 11(d)**  $T= 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



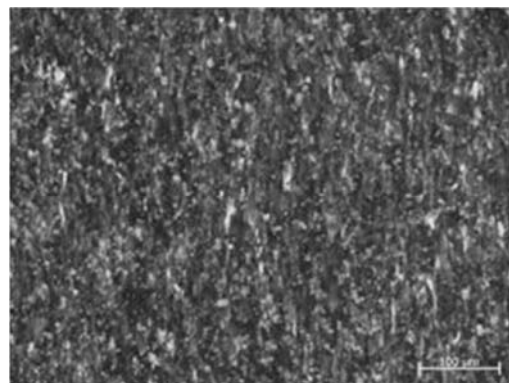
**Figure 12 (a)**  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 12 (a)**  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



**Figure 12 (b)**  $T= 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 12 (b)**  $T= 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



**Figure 12 (c)**  $T= 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 12 (c)**  $T= 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



**Figure 12 (d)**  $T= 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linear heat input 200 J/mm  
**Slika 12 (d)**  $T= 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Linearni unos toplote 200 J/mm



From the diagram it can be concluded that at lowest simulated peak temperature hardness is higher, but softening can be observed at higher simulated peak temperature, however the measured values are still under the derived requirement.

## 5. Summary and conclusions

The reproduction of heat affected zone areas during the TIG welding of 5754-H22, 6082-T6 and 7075-T6 alloy were successfully performed, using the Rykalin 2D model in the Gleeble 3500 physical simulator. Two technological variants ( $Q = 100$  J/mm and  $200$  J/mm, linear heat input) and four peak temperatures  $550$  °C,  $440$  °C,  $380$  °C and  $280$  °C were selected.

Based on the performed simulations and hardness tests the most critical subzone in terms of softening has been identified was the most critical  $440$  °C for 5754-H22, 6082-T6 and  $380$  °C for 7075-T6. It can be seen from HAZ simulation results that for 5754-H22 aluminium alloy with the increase of the linear heat input the hardness of the heat affect zone has decreased further. In case of 6082-T6 aluminium alloy, sub zones have always been softened by the applied linear heat input, and with the increase of linear heat input, the hardness of the heat affected zone has further decreased. We concluded that the hardness was under the derived requirement in all investigated subzones, however by the reduction of linear heat input from  $200$  J/mm to  $100$  J/mm the hardness (and therefore the strength) can significantly increase in case of 7075-T6. The performed optical microscopic tests verified that the demanded subzones were successfully created during the physical simulation.

## Acknowledgements

The described article was carried out as part of the EFOP3.6.1-16-2016-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

Iz dijagrama se može zaključiti da pri nižim simuliranim vršnim temperaturama, tvrdoća je viša, ali omekšavanje se može uočiti.

Na višim simuliranim vršnim temperaturama, ipak merene vrednosti su i dalje ispod postavljenih zahteva.

## 5. Zaključci

Reprodukcija pojedinih oblasti zone pod uticajem toplote za vreme TIG zavarivanja aluminijumskih legura 5754-H22, 6082-T6 i 7075-T6, je uspešno izvedeno primenom Rikalinovog 2D modela na Gleeble 3500 fizičkom simulatoru. Ispitivane su dve tehnološke varijante linearnog unosa toplote ( $Q = 100$  J/mm i  $200$  J/mm) i bile su izabrane četiri vršne temperature  $550$  °C,  $440$  °C,  $380$  °C i  $280$  °C.

Na osnovu izvršenih simulacija i merenja tvrdoća, identifikovane su najkritičnije subzone u pogledu omekšavanja. Najkritičnije za legure 5754-H22 i 6082-T6 je temperatura od  $440$  °C, a temperatura od  $380$  °C za leguru 7075-T6. Može se videti iz rezultata simulacije ZUTa, da kod aluminijumske legure 5754-H22 sa povećanjem linearnog unosa toplote, tvrdoća zone uticaja toplote opada. U slučaju aluminijumske legure 6082-T6, subzone su uvek omekšavale, sa svakim od primenjenih unosa toplote i da sa povećanjem linearnog unosa toplote opada tvrdoća zone uticaja toplote. Može se zaključiti da tvrdoća kod svih ispitivanih subzona, smanjenjem linearnog unosa toplote od  $200$  J/mm do  $100$  J/mm, tvrdoća kao i čvrstoća, mogu značajno da porastu u slučaju legure 7075-T6. Izvršena ispitivanja optičkom mikroskopijom su potvrdila da su planirane subzone uspešno ostvarene primenom fizičke simulacije.

## Zahvalnica

Ovaj rad je urađen kao deo projekta EFOP-3.6.1-16-2016-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” koji je implementiran u okvir programa Szechenyi 2020. Realizacija ovog projekta je sufinansirana od strane EU i kofinansirana od European Social Fund.



## References

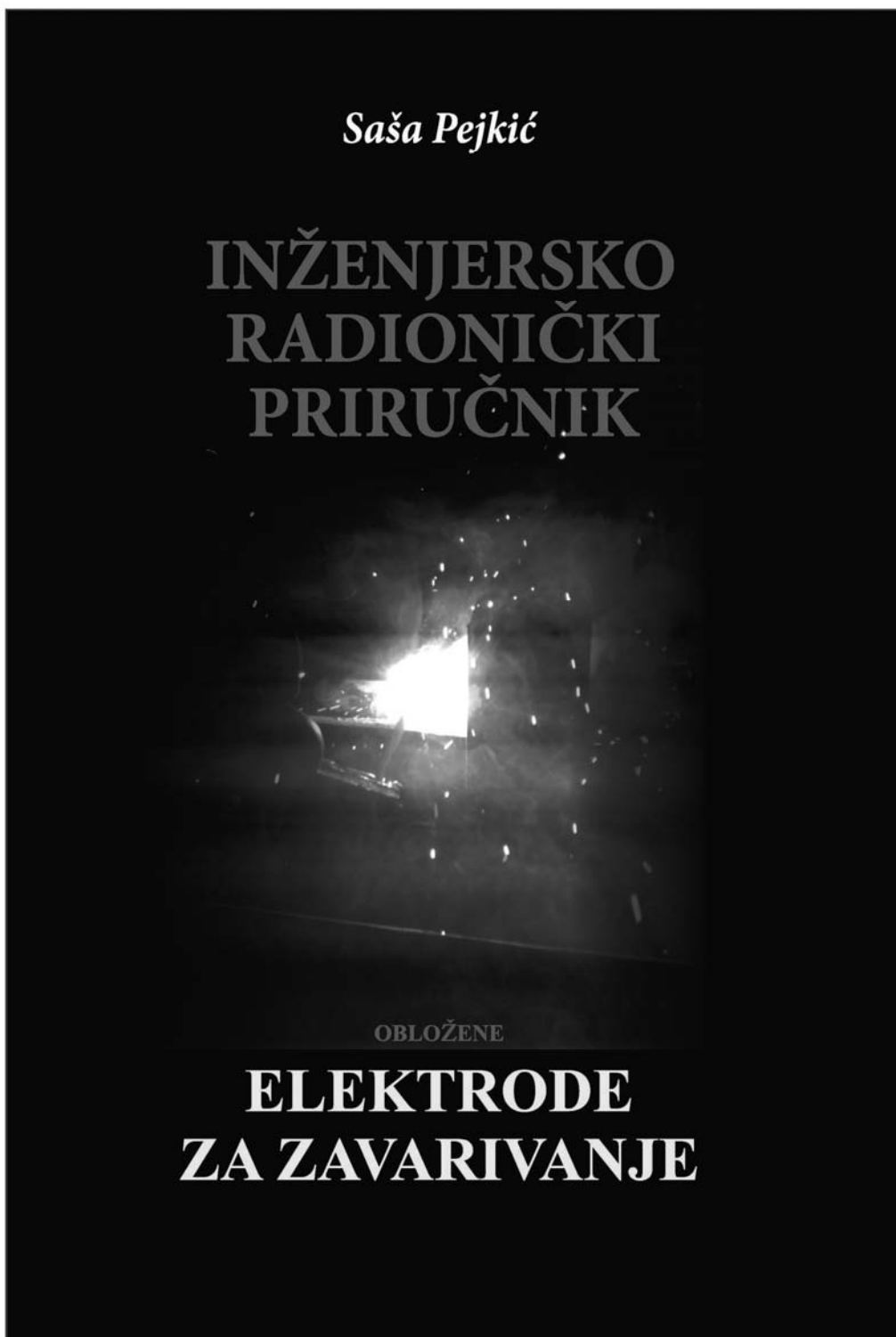
- [1] Lukács J, Meilinger Á and Pósalaky D 2018 *Welding in the World* 62 737–749, <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0599-1>
- [2] Balogh, A, Lukács, J, Török, I 2015 *Weldability and the properties of welded joints: Researches on automotive steel and aluminium alloys (in Hungarian)*, University of Miskolc, 324 (ISBN:978-963-358-081-3)
- [3] Sakurai T 2008 The latest trends in aluminium alloys sheets for automotive body panels. *Kobelco Technol. Rev.* 28 22–28
- [4] Tisza M, Lukács Zs, Kovács, P Z, Budai, D 2017 Research developments in sheet metal forming for production of lightweight automotive parts, *Journal of Physics Conference series* 896 1-10
- [5] Pósalaky D & Lukács J 2015 The Properties of Welded Joints Made by 6082-T6 Aluminium Alloy and their Behaviour under Cyclic Loading Conditions, *Materials Science Forum* 812 375- 380
- [6] Davis J R 1993 *Aluminium and Aluminum Alloys* Ohio: ASM international 1 1–784
- [7] Davis J R 1993 *Aluminum and Aluminum alloy* Materials Park: ASM International
- [8] Mandal N R 2002 *Aluminium welding*. Woodhead Publishing, India
- [9] Mathers G 2002 *The welding of aluminium and its alloys*. Woodhead Publishing, Hong Kong
- [10] Dausinger F 1995 *Strahlwerkzeug Laser Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. PhD. Thesis; Stuttgart
- [11] Bergmann J P, Bielenin M and Feustel T 2015 *Weld World* 59 307–315, DOI 10.1007/s40194-014-0218-8.
- [12] Meilinger Á. and Lukács J 2015 *Materials Science Forum*.794-796 371–376
- [13] Schempp P, Cross C E, Schwenk C and Rethmeier M 2012 *Welding in the world* 10 56
- [14] Jennings P H, Singer A R E and Pumphrey W I 1948 *Journal of the Institute of Metals* 74 227-248
- [15] Sindo Kou 2003 *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons
- [16] Bjorneklett B I, Grong O, Myher O R, Klucken A O 1999 *Metallurgical and Materials Transactions A* 30(A) 2667-2677
- [17] Bakavos D and Prangnell P B 2010 *Mater. Sci. Eng. A* 527 6320–6334
- [18] Rajakumar S, Balasubramanian V 2012 *Mater Des* 40 17–35
- [19] Rajakumar S, Muralidharan and Balasubramanian V 2011 *Mater Des* 32 535–549
- [20] Pósalaky D, Lukács J and Török I 2017 *Materials Science Forum* 885 251-256
- [21] Dobosy A Gáspár M and Török I 2018 *Lecture notes in mechanical engineering* 49 679-693
- [22] Lukács J, Kuzsella L, Koncsik Z, Gáspár M & Meilinger Á 2015 *Materials science forum* 812 149-154
- [23] Gáspár M, Balogh A and Sas I 2015 *IIV International Conference, High-Strength Materials - Challenges and Applications*
- [24] Heikkilä S J, Porter D A, Karjalainen L P, Laitinen R O, Thinen S A and Suikkanen P P 2013 *Mater. Sci. Forum* 762 722-727
- [25] Gáspár M, Tervo H, Kaijalainen A, Dobosy A and Török I 2018 *Lecture notes in mechanical engineering* 49 694-708
- [26] QuikSim™ Software, *Heat Affected Zone Programming Manual: Heat Affected Zone (HAZ) Programming*. Meilinger Á and Lukács J 2014 *Materials Science Forum* 794-796 371-376
- [27] Leroy D, Siewer T A, Liu S and Edwards G R, 1994. *ASM Handbook Vol. 6: Welding Brazing and Soldering*, ASM International, 1356.



## **„Inženjersko radionički priručnik - Obložene elektrode za zavarivanje“**

autora Saše Pejkića

Kolega Saša Pejkić dipl. inž, ponovo je prijatno iznenadio stručnu javnost svojim, drugim po redu inženjerskim priručnikom, ovoga puta na temu obloženih elektroda za zavarivanje. Podsećanja radi, prvi inženjersko radionički priručnik istog autora, koji se odnosio na gasno-plameno rezanje, navarivanje, metalizaciju, lemljenje, "autogeno" zavarivanje i plazma rezanje, je prevazišao svoju namenu i slobodno možemo zaključiti da je u rangu praktične enciklopedije.





Ovoga puta imamo obimno delo istog autora Saše Pejkića, na više od 600 luksuzno opremljenih strana A4 formata, posvećeno starim tehnikama zavarivanja, koje su česte u svakodnevnoj upotrebi u zavarivanju i mašinskom održavanju. Materijal ove knjige obiluje praktičnim primerima gotovo svih standardizovanih obloženih elektroda, namenjenih elektrolučnom zavarivanju nelegiranih, niskolegiranih, finoznih, visokočvrstih čelika i čelika otpornih na puzanje, zatim visoko legiranih, teško zavarivih i nepoznatih čelika, kao i nekih obojenih metala poput nikla, bakra i aluminijuma i njihovih legura. Nekoliko oblasti ovog materijala je posvećeno zavarivanju livenih gvožđa i obojenih metala i njihovih legura. Zahvaljući tome, korisnik priručnika može prepoznati razliku između na prvi pogled sličnih, a bitno različitih obloženih elektroda. Između ostalih, u priručniku bitno mesto su zauzele standardne obložene elektrode koje su namenjene navarivanju. Zahvaljući rešenjima koje nudi priručnik, korisnik može na terenu u uslovima rada sa nepoznatim čelicima da na jednostavan i lagan način reši kompleksne zavarivačke probleme. Jedna od oblasti je namenjena izboru obloženih elektroda kod zavarivanja prepoznatih raznorodnih čelika i materijala.

U ovom materijalu posebne oblasti su posvećene istorijatu i proizvodnji obloženih elektroda, uz niz preciznih hemijskih recepata za zainteresovane koje ova tematika interesuje. Posebna oblast je posvećena sušenju elektroda i relativno kompleksnoj problematici u vezi ove teme. Čitalac se može upoznati sa osnovnim fizičko hemijskim osobinama svih zaštitnih obloga koje se koriste pri izradi obloženih elektroda, kao i pravilnom izboru elektroda u zavisnosti od niza faktora iz konstrukcije obložene elektrode ili praktičnih zahteva tokom primene. Na praktičan način je predstavljena fizika zavarivačkog zaštitnog električnog luka u zavisnosti od vrste struja koje se koriste, pa su našli važno mesto kako bi se olakšao odabir elektroda i opreme za zavarivanje.

Inženjersko radionički priručnik nazvan "Obložene elektode za zavarivanje" je podeljen po oblastima, koje su opisane poznatim standardima koji se koriste u svetu. Da bi čitalac mogao na jednostavan način da koristi ovaj priručnik, osnova za klasifikaciju i prepoznavanje tehničko tehnoloških osobina obloženih elektroda je iskorišćena prema smernicama poznatih standarda koji se koriste u svetu. U prvom redu su korišćeni američki standardi AWS, evropski standardi EN, međunarodni standardi ISO, koji čine okosnicu ovog priručnika. Zatim starijih standarda izašlih iz upotrebe, a koji se često mogu pronaći po katalozima, poput nemačkih standarda DIN, engleskih BS, ali i vrlo bitnih GOST standarda koji se koriste u zemljama bivšeg Sovjetskog Saveza. U svakom pojedinačnom opisu standardnih elektroda u ovom priručniku data je međusobna veza sa spomenutim poznatim standardima, kako bi korisnik mogao brzo da identifikuje obloženu elektrodu i potraži je u katalozima bilo kod proizvođača u svetu. Istovremeno će uputiti čitaoca na potrebno korišćenje spomenutih standarda.

Priručnik "Obložene elektode za zavarivanje" je praktično štivo koje omogućava korisniku pre izbora obloženih elektroda, da se upozna sa terminima iz kataloga, a isto tako i pravilnom prepoznavanju, odabiru i upotrebi obloženih elektroda. Priručnik se koristi i u drugom smeru, jer omogućava da se izabrana elektroda iz priručnika potraži u katalozima obloženih elektroda. Drugim rečima ovaj priručnik omogućava korisniku, da izabere standardizovanu elektrodu sa prepoznatljivom oznakom čak i u katalozima nepoznatih i retkih svetskih jezika. Dovoljno je u nepoznatom katalogu prepoznati univerzalno i standardno označavanje elektrode i njene fizičko hemijske karakteristike, da bi se ona mogla prepoznati, odabrati i koristiti. Stručna javnost do sada nije imala priliku da ima delo ovakvog tipa na raspolaganju ili u ponudi. Preporuka je da bi svako ko se bavi zavarivanjem trebalo da ima ovo delo, jer je izuzetno je korisno i primenljivo.

Inženjersko radionički priručnik pod nazivom "Obložene elektode za zavarivanje", autora Saše Pejkića, može se naručiti na e-mail: [zmajsale@gmail.com](mailto:zmajsale@gmail.com) ili na telefon 064-829 8875 po ceni od 12.000 dinara. Za studente i nezaposlena lica su mogući posebni popusti.

Dr Vencislav Grabulov, IWE



Dr Zoran Karastojković dipl. ing. met.<sup>1</sup>, Dr Radiša Perić dipl. ing. met.<sup>2</sup>

## Kakvi su to „prohromski“ čelici?

### Rad primljen / Paper received:

Januar 2021.

### Adresa autora / Author's address:

1-IHIS Technoexperts, 11080 Zemun, Batajnički put 23.

2-„Perić&Perić“ d.o.o, 12000 Požarevac, Dunavska 114-116.

Činjenica je da kod nas, imajući u vidu i oblast tehnike, nije razvijena praksa da se o stručnim terminima vodi jedna zdrava, stručna i argumentovana rasprava, bilo da se radi o njihovom prevodu sa stranog na srpski jezik ili novonastalim pa i novokomponovanim terminima. Čest je slučaj da se stručnjacima proklamuju oni koji ni čitavih pet minuta nisu proveli u nekoj odgovarajućoj stručnoj instituciji, ali zato mogu da „kumuju“ i daju mnoge „stručne“ predloge, nažalost ne samo po pitanju čelika, ili u smislu „ne može nam niko ništa“ i tome slično. Razlog tome u svesti nekih može biti pozivanje i samozadovoljenje činjenicom da smo imali velike naučnike kao što su Tesla, Pupin, Milankovića i..., pa to je dovoljno (možda i previše) i šta tu ima više da se kaže!? Ali, šta ćemo sa nekim očiglednim propustima i greškama koji su se u tom prostoru i vremenu pojavili? Tehnika generalno ima jasan pristup: ništa drugo no ispravljati ih! Ovde će biti reči o jednom takvom propustu, tačnije u pitanju je rogobatni i netačan naziv „*prohromski čelik*“, a tiče se naziva za jednu veliku grupu nerđajućih čelika. Ovaj termin, između ostalih, rado koriste neki od zavarivača ili kontrolora/inspektora tih poslova.

Najviše u oglasima, ali i u prospektima nekih manjih firmi ili radionica, pojavljuju se preporuke u smislu garancije kvaliteta, da je dotična roba napravljena od „*prohromskog čelika*“, a to su obično bojleri, kazani i slično. Ovde nije reč o umeću tih malih privrednika već o upotrebljenom terminu za isticanje kvaliteta materijala. Radi se o nerđajućem čeliku, iako neki od njih neće ni da čuju za ovaj termin, već je to „*rosfraj*“ čelik, a neki „*pametniji*“ od njih će reći da je to „*rostfraj*“. Kako to nekima stručnije zvuči na nemačkom! Dalje, ima i onih koji neće da koriste ni ove termine jer se, pobogu, radi o nekom drugom, tj. „*inoks*“ čeliku. O primeni engleskog termina „*stainless steel*“ od strane tih ljudi – ni govora. Uistinu, nema ni potrebe, plus što „*mi nećemo da budemo Englezi!*“ Zbog svega toga, kao „*najrazumniji*“ termin kod izvesnog broja ljudi ostaje „*prohromski čelik*“.

Naime, čuli su da takvi čelici sadrže dosta hroma, pa je po njima sasvim logično da ta grupa nosi naziv „*prohromski čelici*“. I šta je tu nejasno? Ipak, ima mnogo toga nejasnog i još mnogima nisu baš do kraja poznati termini koji se odnose na ovu veliku grupu nerđajućih čelika.

### Trgovačka imena za nerđajuće čelike

Dva najpoznatija trgovačka naziva, što bi sada rekli brenda, ne samo kod nas već i u celom svetu, za nerđajuće čelike su *inox* i/ili *prokron*.

Pre nastanka *inox* čelika svi čelici su korodirali, tj. oksidirali u znatnoj meri, tako da su oni čelici koji rđaju, dobili odgovarajući latinizirani pridev - *oxydable*. Kada su se pojavili čelici koji mnogo manje oksidišu, normalno je bilo da se takvi čelici nazovu neoksidirajućim - *inoxidable*, ili skraćeno samo *inox*. Odatle je i nastalo dotično trgovačko ime. To se desilo u vremenu kada su učenici ljudi skoro obavezno poznavali latinski jezik, što ovim današnjim to nikako nije potrebno, ma njima je dovoljan samo menadžment!

Naziv *prokron* nastao je sledećim putem. Posle zaštite imena *inox*, neke druge firme počele su da proizvode čelike istih osobina, ali nisu smele da koriste već spomenuto zaštićeno ime, pa su smislile drugo ime - originalno *procrone*. U srpskom, slovenačkom i hrvatskom jeziku se pojavljuje kao *prokron*. Radi se o složenici: za osnovu je izabran pojam trajnosti, neuništivosti; latinizirano - *chronos*, uzeto iz starogrčke mitologije, a ne iz menadženta. *Kron* je još kod starih Grka i pre Sokrata, postao personifikacija vremena, trajnosti... Između ostalog je uredio haotični kosmos, kako bi nam jedan takav sada dobrodošao(!), premda je *Kron* u mitologiji ostao zabeležen kao prilično okrutan. Njegovo ime se u transkripciji pojavljuje kao *Kronos* ili *Khronos* (*Chronus*), u grčkom *Χρόνος* ili u modernom grčkom *xronos*. U doba Renesanse *Kron* je u učenom svetu bio poznat kao „*otac vremena*“. Dakle, smišljeno je naravno sa razlogom, da kovanica *prokron* označava nešto postojano, što nerđajući čelik po svojim osobinama i jeste.



Ne vršeći razvrstavanje nerđajućih čelika po strukturi ili nameni, u svim tim čelicima od legirajućih elemenata obavezno je prisutan hrom (Cr). Uobičajena količina iznosi oko 12%, a može ga biti do oko 35%, često uz prisustvo još nekih legirajućih elemenata, naravno zavisno od vrste i namene nerđajućeg čelika.

### Hrom (Cr)

Ime ovog metala je izvedeno od grčke reči *χρῶμα*, *chrōma*, u značenju boja, jer je ustanovljeno da brojna jedinjenja hroma daju spektar zaista različitih boja, što se i dan-danas koristi. U tehnologijama obrade površine metala, uključujući i nerđajuće čelike, dobijanje različitih boja je poznato kao hromatiranje. Treba napomenuti da je hromiranje sasvim nešto drugo, obično je to galvansko nanošenje čistog hroma na metal ili plastiku. Hrom je prelazni hemijski element, sjajne i postojane svetlo-sive boje, zbog čega je jedan od glavnih legirajućih elemenata u nerđajućim čelicima. Izgleda da je to navelo neke naše lakomislene ljude da nerđajuće čelike sa visokim sadržajem hroma jednostavno nazovu „prohromskim čelicima“. Činjenica je da su termini *prokron* i *prohrom* veoma slični, ali samo po zvučnosti u izgovoru. Slično tome, po zvučnosti u svetu metala su veoma slični termini npr. *patina* (neretko se imenuje kao jedan od oblika „rđe“) i *platina*, ali ako neko misli da je to isto onda nudim kilo patine za pola kila platine! Ovde se u terminima *prokron* i *prohrom*, očigledno radi o čistom poluznanju, koje naravno može da bude ne samo nepotrebno već i nepouzđano, pa i štetno. U našem narodu je poznata izreka: „nedokucan ekser ničemu ne služi, već samo smeta“, čijim postojanjem se samo pruža lažno pouzdanje i „sigurnost“ da je neki posao delimičnim zakucavanjem uspešno završen.

Termin *prohromski čelik* se ni u jednom jeziku nije pojavio osim u srpskom. Jesmo li toliko pametni? Ne toliko. Treba znati i sledeće: postoje i nerđajući čelici sa preovlađajućim sadržajem nikla u odnosu na hrom, a to je uistinu jako malom broju ljudi poznato, a razlog tome je zaista mali broj takvih čelika u primeni/industriji. A malo ih je, ne zato što su loši već što su to skuplji čelici naravno zbog visoke cene nikla. Visok sadržaj nikla obezbeđuje još bolje antikorozijske osobine u odnosu na hromne nerđajuće čelike. Kada se traži izuzetan kvalitet, onda čelici sa većinskim sadržajem nikla kao legirajućeg elementa, nalaze primenu. Jedan od takvih primera je bila upotreba

Ni-Cr čelika za izradu plašta (od lima) prve američke nuklearne podmornice - jasno je da prestiž (kao u navedenom primeru) ne pita za cenu. Naravno da su i ovde moguće varijacije u sastavu, jer je reč o tehničkom problemu u kojem su moguća različita rešenja. Ovi čelici se primenjuju i u livenom stanju, evo sastava nekih američkih livenih čelika sa preovlađavajućim sadržajem nikla, uz napomenu da to nisu legure nikla:

CN7M (29%Ni, 20%Cr, 3%Cu, 2%Mo); UNS N08007 ili

CN7MS (24%Ni, 19%Cr, 2%Cu, 3%Mo), ostatak železo; UNS J94650

Da ne bude zabune, nerđajući čelici sa preovlađujućim sadržajem nikla se pojavljuju i u nacionalnim standardima drugih zemalja. Ovi nerđajući čelici sa visokim sadržajem nikla imaju potpuno austenitnu strukturu još u livenom stanju, zbog čega im nije neophodna naknadna termička obrada i to im je svakako tehnološka prednost.

Za lakše pamćenje i poređenje, mogu se pratiti oznake na koje je većina inženjera iz ove struke već navikla: vrlo poznati nerđajući čelici (prokroni) sa preovlađujućim sadržajem hroma imaju oznake npr. 18/8, 18/10, 29/9 i dr., dok nerđajući čelici sa niklom, kao preovlađavajućim elementom, imaju oznake npr.: 8/18, 10/20, 20/25, 27/31 i još neka bude navedena oznaka 25/35. U svim ovim oznakama prva brojka se odnosi na maseni procenat hroma, a druga na procenat nikla u čeliku. Kako bi bilo da se poslednje spomenuti čelici nazivaju *pronikl nerđajućim čelicima*? Nikako, samo bi usledio smeh i bagatelisanje prema onima koji bi koristili takav naziv. Odavde je valjda sasvim jasno da je novokomponovani termin *prohromski čelik*, ipak, glupost i kao takav neodrživ. Zar nije dosta rialiti programa? Jasno je da prilikom učenja nije dovoljno „turistički proći“ kroz osnovnu terminologiju o metalima i njihovim legurama, pa bili to i nerđajući čelici. Niko ne traži da „prohromske pristalice“ znaju teoriju legura, ali samo neka malo poštuju struku kojoj je to osnovni posao. Ovde nema glasanja, zna se da većina, pa bila to i „prohromska većina“, ovde ne može i ne sme da donese prevagu u definisanju pravog naziva/termina.

Za proveru iznetog služe dole citirani izvori, uistinu u malom obimu koliko realno postoje. Ukoliko nam neko iznese dokaze suprotno ovde iznetim, rado ćemo mu pokloniti ono pola kile platine dobijene od trampe sa kilogramom patine. Za neupućene: cena platine (kao berzanske robe) varira oko cene zlata, nekada je i viša.



## Posveta

Članak je posvećen sećanju na koleginicu Milicu Antić, dipl. ing. met.

## Literatura

- [1] Grupa autora: Les aciers inoxydables, Les aciers réfractaires, Paris, (1969) 9-98.
- [2] G.P. Thomas: The history of stainless steel - celebrating 100 years, www.azom.com
- [3] Grupa autora: Technical handbook of stainless steel, (2013) www.atlassteels.com.au
- [4] B. Kočovski: Ugljenični i legirani čelični liv, Tehnički fakultet u Boru, Bor (1996) 135-138.
- [5] P. Циммерман, К. Гинтер: Металлургија и материјаловедение, Справочник, превод са немачког, Металлургија, Москва (1982) 231-235; 304-306
- [6] D.R. Gabe: Principles of metal surface treatment and protection, Pergamon press, Oxford, (1972) 7-174.
- [7] З. Карастојковић: Физичка металургија са металографијом, за више школе, Политехничка академија Нови Београд, Нови Београд (1990)
- [8] Ф.Ф. Химушин: Жаропрочније стаљи и сплави, Металлургија, Москва (1964) 182-331.
- [9] E.C. Rollason: Metallurgy for Engineers, Edward Arnold, London, (1973) 59-269.
- [10] А.П. Гуљајев: Металловедение, Металлургија, Москва, (1986) 408-428.
- [11] R.E. Smallman: Modern Physical Metallurgy, Butterworths, London, (1970) 392-404.
- [12] R.E. Reed-Hill: Physical Metallurgy Principles, D. van Nostrand Co, New York, (1973) 284-324.

## Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2021. godinu je 3500,00 dinara

Uplatom članarine stičete pravo na beneficirane cene  
pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 25-9500600002588-46

### Informacije



+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)



[duzs@eunet.rs](mailto:duzs@eunet.rs)

[www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)



### **Otkazan je vodeći svetski sajam SCHVEISSEN & SCHNEIDEN koji je bio zakazan za septembar 2021. godine u Esenu**

Vodeći međunarodni sajam iz oblasti spajanja, sečenja i prevlaka - SCHVEISSEN & SCHNEIDEN, neće se održati 2021. godine. Novi datum održavanja sajma je od 11. - 15. septembra 2023. godine. Tada će se kompanije i partneri iz celog sveta sastati na sajmu Messe Essen u Nemačkoj, kako bi razmenili informacije o najnovijim inovacijama, uslugama i rezultatima istraživanja u ovom važnom sektoru privrede. U svetlu trenutnih uslova, datum prvobitno predviđen za septembar ove godine nije bio ostvariv. Razlog tome je što izlagačima i organizatorima sajma, koji je nedavno okupio oko 50.000 posetilaca, treba sigurnost u planiranju i precizno vreme realizacije.

"SCHVEISSEN & SCHNEIDEN okuplja posetioce iz više od 120 zemalja," kaže Oliver P. Kuhrt, generalni direktor sajma Messe Essen. "S obzirom na trenutna ograničenja putovanja, ove godine nećemo moći da opravdamo reputaciju vodećeg svetskog sajma. Ovome treba dodati i činjenicu da je potrebno vreme realizacije od nekoliko meseci za naše izlagače, koji izlažu složene visokotehnološke pogone na složeno dizajniranim štandovima sajma. Trenutno ne možemo da ponudimo našim korisnicima neophodnu sigurnost planiranja. Novim datumom sajma u 2023. godini, ispunjavamo opravdana očekivanja industrije prema vodećem svetskom sajmu, dostojnom svog imena."

Johannes Ried, generalni direktor firme Microstep Europa GmbH, pozdravlja odluku o otkazivanju sajma i novi datum 2023. godine: „Kao jednom od vodećih svetskih proizvođača sistema za sečenje CNC-om, za nas je SCHVEISSEN & SCHNEIDEN događaj koji se ne sme propustiti. Polazemo veliku nadu u ovaj sajam, koji je do sada uvek i više nego ispunjavao naša očekivanja. Iz tog razloga pozdravljamo novi datum 2023. godine, kada će ponovo biti omogućeni svi uslovi da vodeći svetski sajam bude održan u očekivanom formatu.“

Ovo mišljenje deli i Konrad Mohr, marketinški direktor za centralnu Evropu u kompaniji Air Liquide: „Obično počinjemo da planiramo i koordinišemo svoje učešće na sajmu više od godinu dana unapred i ulažemo mnogo truda u predstavljanje naših proizvoda i usluga širokoj publici. Ovaj trud SCHVEISSEN & SCHNEIDEN nagrađuje prisustvom nacionalnih i međunarodnih partnera koje je u ovom broju i kvalitetu jedino moguće tamo sresti. Održavanje sajma ove godine neizbežno bi bilo povezano sa značajnim ograničenjima, koja takođe namećemo sebi, kako bismo zaustavili pandemiju. Novi datum uliva i nama i industriji sigurnost i održava premisu o kvalitetu samog brenda SCHVEISSEN & SCHNEIDEN - Siguran sam da će imati pozitivan efekat i na sajam i na ponovno okupljanje industrije.“

#### *Industrija čeka SCHVEISSEN & SCHNEIDEN*

Značaj vodećeg svetskog sajma pokazuje činjenica da mnoge kompanije razvijaju svoje inovacije nakon ciklusa SCHVEISSEN & SCHNEIDEN. Stoga je novi datum događaja 2023. godine važan signal za industriju. Dr.-Ing. Roland Boecking, generalni direktor Nemačkog društva za zavarivanje kaže: „Kompanijama, pružaocima usluga i istraživačkim institucijama potreban je SCHVEISSEN & SCHNEIDEN da bi predstavili svoje proizvode i usluge partnerima u industriji. Ovo je utoliko tačnije nakon izazova koje postavlja pandemija korone. Radujemo se novom datumu i u međuvremenu nudimo više mogućnosti razmene umrežavanjem“.



### *Pripreme za 2023. u punom jeku*

U međuvremenu, prethodni planovi za SCHVEISSEN & SCHNEIDEN se neometano nastavljaju. Nedavno je vodeća svetska izložba impresionirala industriju van granica zemlje: u 2017. godini 1.030 izlagača iz 41 zemlje predstavilo je svoje najnovije tehnologije za spajanje, sečenje i prevlake. Čak 94% od ukupno 50.000 posetilaca iz 120 zemalja već je najavilo da će posetiti i predstojeći sajam.

„Nema sumnje da bismo radije uspostavljali poslovne kontakte i gradili odnose u SCHVEISSEN & SCHNEIDEN ove godine umesto 2023. Međutim, ovaj novi datum daje industriji razumnu perspektivu i omogućava nam da započnemo planiranje sajma - onako kako to znamo i volimo - sada“, kaže Johan Fransson, generalni direktor za Evropu, ESAB Europe GmbH, sumirajući očekivanja za sledeće izdanje SCHVEISSEN & SCHNEIDEN.

Izvor: [www.schweissen-schneiden.com](http://www.schweissen-schneiden.com)

### **Otkazano Međunarodno takmičenje u zavarivanju**

Međunarodno takmičenje u zavarivanju, koje je DVS želeo da održi u saradnji sa Međunarodnim institutom za zavarivanje (IIW) i koje je trebalo da se održi u vreme svetskog sajma SCHVEISSEN & SCHNEIDEN, koji je bio zakazan za septembar 2021. godine u Esenu u Nemačkoj, je nažalost otkazano.

Mnogo nepoznatih faktora uzrokovanih pandemijom Corona virusa, sa raznim uslovima koje nameće pandemija i koji se teško mogu predvideti, posebno za učesnike i posetioce iz inostranstva, doveli su do otkazivanja takmičenja.

Ponovo organizovanje Međunarodnog takmičenja u zavarivanju se očekuje da bude u sajamskoj 2023. godini, kada će se od 11. do 15. septembra održati sajam SCHVEISSEN & SCHNEIDEN u Esenu u Nemačkoj.

Izvor: [www.schweissen-schneiden.com](http://www.schweissen-schneiden.com)

**ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 1/2020 WELDING & WELDED CONSTRUCTIONS****NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ**

ZAVARIVANJE LINIJSKIM VISOKOFREKVENTNIM TRENJEM  
LEGURA ALUMINIJUMA I NERĐAJUĆEG ČELIKA

T. Matsuda, H. Adachi, T. Sano, A. Hirose, R. Yoshida, H. Hori, S. Ono

UVOĐENJE NOVOG TERMINA – GUSTINA FERITNOG BROJA  
(FND) ZA MERENJE FERITNOG BROJA ZAVARENIH SPOJEVA  
NA TANKIM LIMOVIMA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA SERIJE 300

R. Kshirsagar, S. Jones, J. Lawrence, J. Tabor

PROŠIRENA PRIMENA SISTEMA ZA PREDVIĐANJE TVRDOĆE  
KOD ZAVARIVANJA ČELIKA A533B ZA RAZNE NISKOLEGIRANE  
ČELIKE

L. Yu, K. Saida, K. Nishimoto

NOVA FORMULA ZA ODREĐIVANJE VREMENA HLAĐENJA T8/5  
SA OSVRTOM NA KVALITET ZAVARIVANJA

M. Milićević, V. Nejković

**OBRAZOVANJE**

SERTIFIKACIONO TELO ZA SERTIFIKACIJU ZAVARIVAČKOG  
OSOBLJA SRBIJE

**EDUCATION**

MOGUĆNOSTI SERTIFIKACIJE ZAVARIVAČKOG INŽENJERINGA

K. Bagheri

**SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT**

HIGH-FREQUENCY LINEAR FRICTION WELDING BETWEEN  
ALUMINUM ALLOYS AND STAINLESS STEEL

INTRODUCTION OF A NEW TERM - FERRITE NUMBER DENSITY  
(FND) TO MEASURE THE FERRITE NUMBER OF WELDS ON  
THIN 300 SERIES STAINLESS STEEL SHEETS

EXTENDED APPLICATION OF HARDNESS PREDICTION  
SYSTEM FOR TEMPER BEAD WELDING OF A533B STEEL TO  
VARIOUS LOW-ALLOY STEELS

NEW T8/5 COOLING TIME FORMULA  
RELATING TO WELDING QUALITY

WELDING ENGINEERING CERTIFICATION OPTIONS

**ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2/2020 WELDING & WELDED CONSTRUCTIONS****NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ**

MIKROSTRUKTURNI PROCESI KOJI SE ODVIJAJU TOKOM  
PUZANJA LEGURE AA2024- T3 ZAVARENE TRENJEM SA  
MEŠANJEM

M. Regev, S. Spigarelli

MERENJE ZAOSTALIH NAPONA BEZ RAZARANJA U  
KONSTRUKCIONIM DELOVIMA MOSTOVA

J. Kleimana, Y. Kudryavtsevb

UTICAJ NEUSKLAĐENOSTI NA GRANIČNE KRIVE ŠIRENJA  
ZAMORNIH PRSLINA OSNOVNIH MATERIJALA TIPA S690KL,  
S960KL I S960TM I NJIHOVIH, ELEKTROLUČNO U ZAŠTITI  
GASA, ZAVARENIH SPOJEVA

J. Lukácsa, H. Mobarkb

POBOLJŠANJE OSETLJIVOSTI NA VRUĆE PRSLINE I  
PRODUKTIVNOST UPOTREBOM SUPER-TIG ZAVARIVANJA  
ČELIKA SA 9% NIKLA

M. Cheepua, J. H. Parkb, H. J. Baekc, S. M. Chod

PROŠIRENA PRIMENA SISTEMA ZA PREDVIĐANJE TVRDOĆE  
KOD ZAVARIVANJA ČELIKA A533B ZA RAZNE NISKOLEGIRANE  
ČELIKE

L. Yu, K. Saida, K. Nishimoto

**SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT**

MICROSTRUCTURAL PROCESSES OCCURRING DURING  
CREEP OF FRICTION STIR WELDED AA2024-T3 ALLOY

NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENTS OF RESIDUAL  
STRESSES IN STRUCTURAL DETAILS OF BRIDGES

MISMATCH EFFECT ON FATIGUE CRACK PROPAGATION LIMIT  
CURVES OF S690QL, S960QL AND S960TM TYPE BASE  
MATERIALS AND THEIR GAS METAL ARC WELDED JOINTS

IMPROVEMENT OF HOT CRACKING SUSCEPTIBILITY AND  
PRODUCTIVITY USING SUPER-TIG WELDING FOR 9% NICKEL-  
STEEL

EXTENDED APPLICATION OF HARDNESS PREDICTION  
SYSTEM FOR TEMPER BEAD WELDING OF A533B STEEL TO  
VARIOUS LOW-ALLOY STEELS

## ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 3/2020 WELDING &amp; WELDED CONSTRUCTIONS

## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

POBOLJŠANJE OSETLJIVOSTI NA VRUĆE PRSLINE I  
PRODUKTIVNOST UPOTREBOM SUPER-TIG ZAVARIVANJA  
ČELIKA SA 9% NIKLA

M. Cheepua, J. H. Parkb, H. J. Baekc, S. M. Chod

MERENJE ZAOSTALIH NAPONA BEZ RAZARANJ PROMENE  
MIKROSTRUKTURE I MEHANIČKIH SVOJSTAVA U ZONI  
UTICAJA TOPLOTE ZAVAREN OG SPOJA ČELIČNIH TRAKA  
KLASE S960MC U KONSTRUKCIONIM DELOVIMA MOSTOVA

M. Mičian, M. Maronek, R. Konar, D. Harmaniak, M. Jambor, L. Trško, J. Wincek

UTICAJ STRATEGIJE IZRADE NA MEHANIČKE OSOBINE  
NISKOLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE U ADITIVNOJ  
PROIZVODNJI ŽICOM I ELEKTRIČNIM LUKOM

A. Suat Yildiz, B. Koc, Prof. Dr. O. Yilmaz

## SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

IMPROVEMENT OF HOT CRACKING SUSCEPTIBILITY AND  
PRODUCTIVITY USING SUPER-TIG WELDING FOR 9% NICKEL-  
STEEL

NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENTS OF RESIDUAL  
STRECHANGES OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF THE HAZ OF THE S960MC STEEL SHEET  
WELD JOINT STRUCTURAL DETAILS OF BRIDGES

BUILDING STRATEGY EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES  
OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL IN WIRE + ARC  
ADDITIVE MANUFACTURING

## PRAKSA

POBOLJŠANJE OSOBINA METALA ŠAVA I ZUT KOD  
ZAVARIVANJA MAG POSTUPKOM PRIMENOM ZAVARIVANJA  
TRENJEM SA ALATOM

S. Kumar Gupta, A. Ravi Raja, A. Kumar, M. Vashista, M. Zaheer Khan Yusufzai

## PRACTICE

IMPROVING GMAW WELD METAL AND HAZ PROPERTIES  
THROUGH FRICTION STIR PROCESSING

## ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 4/2020 WELDING &amp; WELDED CONSTRUCTIONS

## NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

PRILOG NOVIM IZRAČUNAVANJIMA TEMPERATURE  
PREDGREVANJA I DIFERENCIRANJA PRIMENOM  
LAGRANŽEOVE INTERPOLACIJE

M. Miličević

KARAKTERIZACIJA BEINITNO-FERITNIH STRUKTURA  
FORMIRANIH U ZONI UTICAJA TOPLOTE ZAVAREN IH SPOJEVA  
RAZLIČITIH ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE (S700MC/S960QC) I  
NJIHOVA ZAVISNOST OD BRZINE HLAĐENJA

F. Njock Bayock, P. Kah, B. Mvola, P. Layus, X. Cai

CONTRIBUTION TO NEW CALCULATIONS OF PREHEATING  
AND DIFFERENTIATION TEMPERATURES USING LAGRANGE  
INTERPOLATION

CHARACTERIZATION OF BAINITE-FERRITE STRUCTURES  
FORMED ON THE HEAT-AFFECTED ZONE OF A DISSIMILAR  
WELDS OF HIGH-STRENGTH STEEL (S700MC/S960QC) AND  
THEIR DEPENDENCY ON COOLING TIME

## PRAKSA

POBOLJŠANJE OTPORNOSTI NA ZAMOR ZAVAREN IH  
ELEMENATA PRIMENOM OBRAD E ULTRAZVUČNIM UDAROM

Y. Kudryavtsev

## PRACTICE

FATIGUE IMPROVEMENT OF WELDED ELEMENTS BY  
ULTRASONIC IMPACT TREATMENT

## OBRAZOVANJE

FIZIČKA SIMULACIJA VIRTUELNOG ZAVARIVANJA U REALNOM  
VREMENU

O. Mokrov, A. Schmidt, M. Simon, U. Reisgen, A. Behmel, J. Martin, D. Rudolph, A. Becirovic

## EDUCATION

REAL TIME PHYSICAL SIMULATION FOR VIRTUAL WELDING  
TRAINING

## ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

### Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2021

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	39 000	23 000	16 000	10 000
	kolor	105 000	75 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljivanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25 % od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
  - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
  - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
  - izrada filma sa CD: 10 % od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, ([www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

### WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review

#### Advertising prices for four successive numbers in 2021

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	840	432	336	240
	colour	2 640	1 680	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30 % of black/white advertising price.
- Print material:
  - for black/white CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW)
  - for color CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

### INDEKS OGLAŠIVAČA

#### ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS  
WELD-ING  
YASKAWA SLOVENIJA  
HONEX  
ELIMP  
NEMINIK

1. ČLANARINA DUZS za 2021. godinu ..... **3.500 dinara**  
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2021. godina  
u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%):
  - cena pojedinačnog broja..... 825 dinara
  - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... 2.500 dinara
3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%)
  - a) u slobodnoj prodaji:
    - cena pojedinačnog broja za 2019. godinu ..... 500 dinara
    - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
  - b) beneficirane cene za članove DUZS:
    - cena pojedinačnog broja za 2020. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) ..... 400 dinara
    - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) ..... Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) ..... 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma ..... 6.750 dinara