



Prof.dr Miroslav S. Miličević<sup>\*1</sup>, Dr Valentina M. Nejković<sup>\*2</sup>

# NOVA FORMULA ZA ODREĐIVANJE VREMENA HLAĐENJA $t_{8/5}$ SA OSVRTOM NA KVALITET ZAVARIVANJA NEW $t_{8/5}$ COOLING TIME FORMULA RELATING TO WELDING QUALITY

**Pregledni rad / Review paper**  
**UDK / UDC: 621.791.7 : 620.178**

**Rad primljen / Paper received:**  
Mart 2020.

**Ključne reči:** VF zavarivanje, tvrdoća, hemijski sastav, cev, struja, napon, kritično vreme hlađenja

## Rezime

Ovde će se dati pregled teoretskih i praktičnih rezultata kroz radove iz renomiranih časopisa iz oblasti zavarivanja čeličnih cevi. Izdvajaju se dve grupe istraživanja, jedna koja se bazira na primeni simulacionih paketa za modeliranje zavarivanja. Drugoj grupi pripada ovaj rad koji se pored teoretskih i egzaktnih izračunavanja, bavi opsežnim eksperimentalnim istraživanjima koja imaju karakter optimizacije parametara zavarivanja. Svi izloženi radovi biće ocenjivani preko ocene kvantitativnih i kvalitativnih rezultata dobijene finalne cevi i kompletnog procesa izrade.

## 1. UVOD

Prikaz rezultata ovog rada je moguć uz pomoć literature date u [1-23]. Navedenim referencama dat je opis i kretanje teoretskog istraživanja VF zavarivanja čeličnih cevi.

Radovi [24-31] se bave razvojem magnetnih koncentratora na bazi magnetodielektrika i simuliranjem njihovih primena korišćenjem paketa ELTA.

U radu [32] se autori bave prikazom numeričke analize VFZ cevi. Prvo se navode poznate jednačine a zatim i jednačine termodinamičkog ponašanja zavarivanja, bez citiranja odakle su jer se ne vidi njihovo izvorno izvođenje. Ove jednačine se navode radi prikaza simulacionog paketa ANSYS koji se zasniva na primeni poznate metode numeričke matematike koja se sreće pod imenom metoda konačnih razlika.

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

<sup>\*1</sup>Visoka tehnička škola, Univerzitet u Beogradu

<sup>\*2</sup>Docent Elektronskog fakulteta u Nišu, Univerzitet u Nišu

**Keywords:** HF welding, hardness, chemical composition, pipe, current, voltage, critical cooling time

## Abstract

An overview of theoretical and practical results will be given here through papers from renowned magazines in the field of welding steel tubes. Two research groups are distinguished, one based on the application of welding modeling simulation packages. The second group belongs to this paper, which, in addition to theoretical and exact calculations, deals with extensive experimental studies that have the character of optimization of welding parameters. All the exhibited works will be evaluated through the evaluation of the quantitative and qualitative results of the final pipe and the complete design process.

Radovi [33-35] obrađuju induktivno zavarivanje cevi većeg prečnika bez ocene energetske efikasnosti, a bavi se ocenom kvaliteta zavarenog spoja čelične cevi kroz prikaz promene i ponašanja hemijskog sastava elemenata materijala cevi i tvrdoće. Pri estimaciji se koristi potrebna moderna instrumentacija za merenje i primena simulacionog softvera tipa HKL Chanel 5.

U radu [36] je data analiza VF zavarivanja, gde se posle navođenja osnovnih jednačina prelazi na prikaz primene FEM analize i 3D paketa za simulaciju tipa COMSOL 4.2. Daje se akcenat pri analizi na V petlju i prikaz relevantnih promena parametara zavarivanja. U referencama toga rada daje se osvrt na citiranu literaturu iz ovog rada i to [33,35].

Kroz rad [37] autori daju analizu zavarivanja cevi primenom paketa i praktično merenjem na realnom modelu. Upoređivanjem razlika daju izvesne



zaključke za koje smatraju da daju prilog primenama. Treba istaći da se merenje temperature u zoni šavaa cevi izvodi pomoću termoparova.

U referenci [2] ovog rada se daje pregled metoda za simulaciju VF zavarivanja i kompanija koje se specijalizovano bave izradom softvera za simulaciju kao što su ANSYS; SYSWELD; Cosmos Corp., Vector, Ansoft itd. Uglavnom se koristi 3D simulacija.

Autori rada su se bavili teoretskim istraživanjima sa velikim naglaskom na primenjena istraživanja, što je ilustrovano u referencama [38-44]. Pri istraživanjima autori su koristili numerička izračunavanja koja su svojim aproksimacijama poboljšali jednodimenziono predstavljanje zavarivanja, pri čemu je kao korekciona metoda bila uvek prisutna eksperimentalna metoda zavarivanja u normalnom procesu zavarivanja.

## 2. TEORIJSKI MODEL VF ZAVARIVANJA

U bogatoj literaturi koja je prilog ovog rada [1-4] izlaže se teorija VFIZ kroz 2D i 3D modele što je bilo baza da se stvore mnogi paketi za simulaciju. Ali, zbog nemogućnosti posedovanja i nabavke ovih paketa, autori rada su se oslonili na jednodimezionalno proračunavanje koristeći literaturu [5-7]. Ovom izračunavanju autori dodaju i integrišu rezultate višegodišnjih primenjenih istraživanja i svojih publikovanih radova. Na bazi toga su izrađeni programi u jeziku C++, gde se

formiranjem višestrukih programskih petlji i korišćenjem površinske i dubinske metode grejanja i zavarivanja, dobija mogućnost izračunavanja svih relevantnih veličina koje predstavljaju VF zavarivanje.

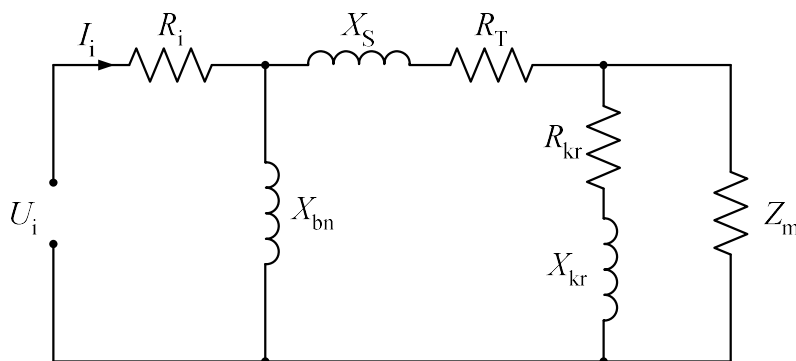
Induktivno zavarivanje cevi može se svesti na slučaj indukcije na polubeskonačnu sredinu. Dejstvo talasa se dešava iz sredine koja je dielektrična u provodnu u kojoj se zanemaruju dielektrične struje, te se rešavanjem Maksvelovih jednačina prema [1-8], dobijaju izrazi za magnetno polje H, električno polje E i snagu S redom u obliku:

$$\underline{H} = \underline{H}_0 e^{\frac{z}{\Delta}} \cdot e^{-j\frac{z}{\Delta}}, \quad (1)$$

$$\underline{E} = \frac{\sqrt{2}}{\gamma\Delta} \underline{H}_0 e^{\frac{z}{\Delta}} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{4} - \frac{z}{\Delta}\right)} \quad i \quad (2)$$

$$\underline{S} = \frac{\sqrt{2}}{2\gamma\Delta} H_{0m}^2 e^{\frac{2z}{\Delta}} \left( \cos \frac{\pi}{4} + j \sin \frac{\pi}{4} \right). \quad (3)$$

Na osnovu citirane literature, a za slučaj induktivnog zavarivanja cevi uz upotrebu spoljašnjeg induktora, ima se zamenska šema na sl.1.



Sl.1 Ekvivalentna šema zavarivanja

Razvijanjem je dobijen algoritam za izračunavanje svih potrebnih veličina kod VF induktivnog zavarivanja čeličnih cevi. Praktično izračunavanje će se obavljati za konkretne primere zavarivanja cevi, pri čemu će se poštovati tehnološke preporuke Wean Uniteda (PENA USA), Damirona iz Francuske i Elphiaca iz Belgije. Koristiće se rezultati iz publikovanih radova autora ovog rada [38-44]. Rezultati će se upoređivati sa onim koji su dobijeni u radovima koji koriste simulacione pakete.

## 3. REZULTATI

### 3.1 Komparativna analiza

U radovima [24-31] se opisuje primena magnetodielektrika za termičko grejanje i zavarivanje primenom simulacionih paketa za modeliranje ELTA. Rezultati dobijeni iz simulacija se ne upoređuju sa praktičnim primenama. Kod obrade VF zavarivanja čeličnih cevi ne navodi se ni kolika je ušteda i ne koristi se ni jedan kriterijum za ocenu energetske efikasnosti kao što to rade autori ovog rada u [38,39,47]. Pokušavaju se čak



pozajmiti rezultati rada autora iz [38,39] time što ih se prijavljuje svojim patentom u nekoliko zemalja. Firma Fluxtrol je razvila za VF zavarivanje magnetodielektrik B koji je u praksi pokazao poražavajuće rezultate kako sa aspekta energetske efikasnosti tako sa aspekta kvaliteta dobijene zavarene čelične cevi. Autori ovog rada, posle višegodišnjih istraživanja, su došli na ideju da iskoriste za zavarivanje MD materijal koji je predviđen da radi na srednjim frekvencijama, pri tome žrtvujući njegovu dužinu trajanja, ali su tada dobili veliku energetsku uštedu i kvalitetan spoj što je potvrđeno publikovanim radom u časopisu visokog renomea [44].

U radu [32] se opisuje VF zavarivanje kroz prikaz teorije radi uvođenja u primenu gotovog simulacionog paketa ANSYS. Vršiti se simulacija zavarivanja čelične cevi prečnika 219 mm i debljine zida 8,94mm, gde se koristi impedier dužine čak 800 mm bez navođenja vrste magnetnog koncentratora. Pošto su prikazani numerički podaci nedovoljno ubedljivi, autori su pristupili preciznom izračunavanju. Gospodin Han nije naveo koja je brzina zavarivanja, autori ovog rada su prepostavili minimalno kritičnu brzinu od 15m/min ispod koje ne bi trebalo da se ide iz više razloga. Stvarna snaga u ivicama trake koja se zavaruje iznosi 321 kW uz struju koje teče V petljom od 3914 A. Zaključuje se da je struja veća od struje dobijene simulacijom od 1800 A. Snaga koja se odaje induktoru iznosi 591 kW uz struju

koja teče kroz induktor od 8106 A i napon na induktoru od 2611 V.

Simulacioni paket nije dao korektno rezultate, pod uslovom da su se koristili ulazni parametri i preporuke iz analiziranog rada, što potvrđuje koeficijent iskorišćenja snage od 0,54. Rezultati su dobijeni na osnovu opisanog algoritma i preporuka kompanije Wean United iz USA, koja ima licencirane proizvodne tehnološke linje za izradu cevi.

Obavljaju se praćenja tvrdoće u zoni spoja, i nešto van, a ne konstatuje zašto dolazi do promene. Pri prikazivanju tvrdoće gosp. Han je citirao rad [44] u jednom od kineskih časopisa, koji je originalan rad autora ovog rada, ali ga nije citirao u radu publikovanoma u WJ USA iz njemu poznatih razloga. Šta više i to nije do kraja uspelo budući da su autori u radu [40] prikazali promenu u delu spoja cevi, ali i promene po čitavom preseku čelične cevi. Radi ilustracije redom se daju prikazi praktično merenih tvrdoća po celom preseku u tabelama  $T_1, T_2$  i  $T_3$ .

Naime kod hladnog deformisanja čelične trake u cev ili profil, usled termičkog tretmana i kao što se pokazalo uticaja elektromagnetnog polja induktora i koncentratora polja dolazi do promene tvrdoće. Iz ovih razloga u ovom radu će se obaviti merenje tvrdoće po metodi Vickersa [HV].

U tabeli  $T_1$  je prikazan rezultat merenja tvrdoće osnovne čelične trake, pre ulaska u zavarivanje. Srednja vrednost tvrdoće, izmerene na više mesta na traci, iznosi 211 HV.

Broj merenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća [HV]	215	218	215	214	185	217	216	223	185	225
Srednja vrednost [HV]: 211										

**Tabela  $T_1$ :** Tvrdoće osnovne čelične trake

Tabela  $T_2$  prikazuje merene podatke o tvrdoći cevi van spoja čelične cevi zavarene feritnim koncentratorom, merene po obimu cevi, gde je srednja vrednost 270 HV. Tvrdoća cevi zavarene istim koncentratorom, merena duž spoja, data je u

Broj merenja	1	2	3	4	5
Tvrdoća [HV]	273	285	245	276	270
Srednja vrednost [HV]: 270					

**Tabela  $T_2$ :** Tvrdoća cevi van spoja zavarene feritnim koncentratorom polja

Broj merenja	1	2	3	4	5
Tvrdoća [HV]	274	385	390	350	375
Srednja vrednost [HV]: 355					

**Tabela  $T_3$ :** Tvrdoća spoja cevi zavarene feritnim koncentratorom polja

tabeli  $T_3$ , gde je srednja vrednost 355 HV. Primećuje se u spoju i van spoja da je tvrdoća povećana znatno usled termičkog tretmana i izlaganja elektromagnetnom dejstvu induktora generatora.



Zaključuje se da se tvrdoća u spoju i van spoja čelične cevi usled visokofrekventnog induktivnog zavarivanja menja u odnosu na tvrdoću ulazne čelične trake, što autori u radu [32] nisu utvrdili ni dovoljno istražili. U istom radu se simulira pomeranje položaja impedera, što je nepotrebno budući da proizvođač generatora daje optimalne podatke za podešavanje. Prikazu metalografskih snimaka nedostaje snimak materijala osnovne trake ili bar hemijski sastav trake što je uobičajeno. Nema analize energetske efikasnosti što je u današnje vreme glavni uslov.

U radovima [33-35] se daje prikaz istraživanja visokofrekventnog induktivnog zavarivanja, vrši se identifikacija defekata i daje predlog za termičko tretiranje radi poboljšanja kvaliteta cevi. Autori rada žele prikazati da istražuju na praktičnom generatoru za zavarivanje, a navode izvor iz 1980 godine. Kao glavni rezultat pomenutih radova navodi se da se prilikom VF zavarivanja menja hemijski sastav u spoju cevi a samim tim i struktura materijala, ali pri tome ne citiraju rad autora ovog rada [44] kojim se prikazuje ovaj pronalazak čime je steknuto pravo prvenstva, jer je rad publikovan 2006. godine. U grupi radova se ne poklanja pažnja teoriji zavarivanja iako se navodi ispitivanje na proizvodnji čelične cevi prečnika 0,5m i debljine zida 10mm. Radi celovitosti, autori ovog rada su izvršili projektovanje ovog zavarivanja.

Autori ovog rada su istraživali impeder sa magnetodielektrikom tipa B za visokofrekventno induktivno zavarivanje cevi, koji je baš razvijen za ovu vrstu zavarivanja. Rezultati hemijske analize dobijeni su na profesionalnom optičkom kvantometru ARL 513. U preseku cevi van spoja, je identifikovan ugljenik u iznosu od 0,4416%.

Time su autori ovog rada pronašli da neki koncentratori remete hemijsku strukturu. Ovo se dokazuje i po istraživanjima Šumana [15] gde se navodi da se sa preko 0,35% ugljenika u čeličnom materijalu javljaju krte strukture.

Detektovani nedostaci u spoju cevi se navodno pokušavaju novom metodom termički tretirati radi otklanjanja nedostataka. Autori spornih radova pokušavaju da uvođenjem sekundarne rekristalizacije definišu jedan nov postupak što je nažalost netačno jer to postoji u pokazanoj teoriji i već se dugo koristi u praksi. Davno se zna da se zagrevanjem iznad temperature rekristalizacije struktura deformisanog metala preobražava u strukturu rekristalizacije iza koje se dobija ravnoosnost zrna i relativna ujednačenost njihovih veličina. Ovde se ne istražuje uticaj brzine čelične cevi pri proizvodnji na strukturu materijala iako je to poznato u brojoj i ovde predloženoj literaturi.

Pored pobrojanih uzroka za nastanak defekata, bitna je i brzina deformacije kod formiranja čelične cevi, što se ignoriše ili nije poznato.

U radu [36] analizira se indukciono grejanje u smislu ostvarivanja VF zavarivanja. Daje se opis preko citiranih radova iz oblasti teorije i eksperimentalnih istraživanja, gde se ostvaruje veza sa radovima autora [33-35]. Opisuje se značaj frekvencije, zona toplotnog tretiranja, V petlja zavarivanja, feritni impeder i njegova pozicija. Opisuje se zavarivanje kroz poznate jednačine iako se usvaja gotov sistem za simulaciju VF zavarivanja čeličnih cevi COMSOL 4.2. Rad pokušava da obradi jedan praktičan primer zavarivanja cevi, ali se ne navode svi relevantni ulazni podaci koji su potrebni za izračunavanje svih električnih i termičkih veličina. Svaki primer iz rada, se mora precizno opisati kako bi se na svakom drugom mestu mogao proveriti i ponoviti taj eksperiment. Pošto autori ne navode sve ulazne podatke a citiraju radove [33-35], to znači da rade projektovanje zavarivanja na cevi prečnika 500 mm. Dobili su parametre za struju od 1000 A i napon 500V, radeći navodno na frekvenciji od 200 do 500 kHz. Izbor dimenzije cevi i citirana literatura ukazuju da se radi o primeru koga su projektovali i izračunali autori ovog rada. Ako se usvoji minimalna kritična brzina za ovu cev dobija se struja u ivicama trake za navedenu cev u iznosu od 2854 A, odnosno struja kroz induktor 3605 A, što je znatno više od prikazanih 1000 A. Navode da su kao bazni materijal koristili čeličnu traku sa 10% ugljenika, što je netačno.

Dalje će se prostudirati rad [37] u kome se prikazuje indukciono grejanje kod uzdužnog zavarivanja cevi. Prikazuje se model eksperimenta zavarivanja čelične cevi koja je fiksirana budući da je stacionarna zbog priključenih termospregova radi merenja temperature. Ne navodi se vrsta magnetnog koncentratora za impeder, što navodi da autori ovog rada misle da je to irelevantno. Navode se neki numerički podaci, ali nema glavnog podatka kog je prečnika cev koja se zavaruje, i koje debljine zida, te ispada da je to nebitno. Ali, nažalost to je netačno, pa gde je Zakon o održanju energije. Netačno je prikazana distribucija temperature bez impedera posle proteklog vremena od 4s. Ovde u spornom radu neuspeo je brzi pokušaj spajanja nepotpunih eksperimentalnih podataka zavarivanja i onih sa modeliranjem. Pokušaj da se prikažu rezultata promena u zavarivanju ako se pomera induktor, impeder i ostalo nisu novi jer su poznati u literaturi a posebno u brojnim radovima [38-44].



### 3.2 Izvođenje nove analitičke zavisnosti

Bitnu ulogu kod termičkog tretiranja čeličnih materijala imaju veličine kao što su vreme hlađenja  $t_{8,5}$ , tvrdoća HV i  $CE_{IIW}$  ekvivalent ugljenika. Vreme  $t_{8,5}$  predstavlja kritično vreme pri hlađenju čelika od temperature  $800^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$ . Tvrdoća se meri tvrdomerom ali od njenog iznosa zavise bitne mehaničke osobine. Hemijski sastav, izražen preko  $CE_{IIW}$ , nazvan ekvivalentom ugljenika ima uzročno posledične veze sa prethodnim veličinama.

Na osnovu [2-4], poznata je relacija za izračunavanje ekvivalenta ugljenika:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (4)$$

Za određivanje vremena hlađenja  $t_{8,5}$  postoji veoma iscrpna eksperimentalna dilatometrijska metoda [15], koja za različite vrednosti C i tvrdoće čelika određuje ovo vreme.

Ovde će se u radu dati jedan numerički postupak za određivanje zavisnosti  $f(t_{8,5}, HV, CE_{IIW})$ . Pošto je gotovo nemoguće eksperimentisati sa mnogo vrsta čelika koji imaju različite vrednosti  $t_{8,5}$ , to će se iskoristiti vrednosti termalnog simulatora iz [45,46], gde se razmatraju vrednosti  $t_{8,5}$  od 2,4,6,8 i 10s.

Za određivanje analitičke zavisnosti tvrdoće HV po Vickersu u funkciji  $CE_{IIW}$  koristiće se iskustva iz rada [46]. Sa dovoljnom tačnošću se može usvojiti polinom prvog stepena tako da se dobija linearna zavisnost. Imaju se sledeće aproksimativne relacije:

$$t_{8,5} = 2s; H_{HV} = 830CE_{IIW} + 100 \quad (5)$$

$$t_{8,5} = 4s; H_{HV} = 760CE_{IIW} + 100 \quad (6)$$

$$t_{8,5} = 6s; H_{HV} = 740CE_{IIW} + 120 \quad (7)$$

$$t_{8,5} = 8s; H_{HV} = 760CE_{IIW} + 100 \quad (8)$$

$$t_{8,5} = 10s; H_{HV} = 620CE_{IIW} + 110. \quad (9)$$

U opštem slučaju se može uspostaviti relacija

$$H_{HV} = a CE_{IIW} + b, \quad (10)$$

gde se do sada parametar  $t_{8,5}$  uzimao kao nezavisna promenljiva funkcija a i b, te se dobija

$$a = -27t_{8,5} + 890 \quad (11)$$

$$b = 110, \quad (12)$$

što posle zamena daje

$$H_{HV} = (-27t_{8,5} + 890)CE_{IIW} + 110, \quad (13)$$

čime je uspostavljena formula razmatranih triju veličina  $H_{HV}, t_{8,5}$  i  $CE_{IIW}$ .

Jednakost (25) se može iskoristiti za izračunavanje  $t_{8,5}$ , te se ima

$$t_{8,5} = \frac{890CE_{IIW} + 110 - H_{HV}}{27CE_{IIW}} \quad (14)$$

Ekvivalent ugljenika se dobija hemijskom analizom na optičkom kvantomeru a tvrdoća pomoću tvrdomera, gde se iz (14) prosto izračunava  $t_{8,5}$ .

**Primer 1.** Odrediti vreme hlađenja i kritičnu brzinu hlađenja za zavarenu čeličnu cev feritnim koncentradorom polja.

Na osnovu hemijskog sastava je utvrđena vrednost za  $CE_{IIW}$  u iznosu od 0,3416 i tvrdoća od 340 HV. Smenom poznatih u (14) se dobija

$$t_{8,5} = 8 s, \quad (15)$$

odakle se može izračunati i kritična brzina hlađenja

$$W = \frac{300}{8} = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C/s} \quad (16)$$

**Primer 2** Za čeličnu cev koja je zavarena pomoću magnetodielektričnog impedera Fluxtrol B, čiji je hemijski sastav:

a). Hemijski sastav u spoju cevi Fe-0,2504C-0,02747Si-0,0022S-0,00123P-0,56039Mn-0,02118Ni-0,01551Cr-0,01814Nb-0,0451Al-0,03358Mo-0,01551V-0,03886Cu wt%.

b). Hemijski sastav van spoja cevi Fe-0,4416C-0,04553Si-0,00034S-0,00183P-0,54769Mn-0,0196Ni-0,01751Cr-0,01223Nb-0,05871Al-0,03208Mo-0,01248V-0,03594Cu wt%., odrediti tvrdoću po Vickersu.

Smenom poznatih u relaciji (13) dobija se vrednost tvrdoće u spoju od  $H_{HV}=352$  HV što je na nivou vrednosti izmerene i prikazane u tabeli T<sub>4</sub>. Ali vrednost tvrdoće po celom preseku cevi iznosi, posle smene poznatih u (13), 481 HV. Ova izračunata vrednost odstupa značajno u odnosu na vrednost iz tabele T<sub>3</sub> što proizvod čini vanklasnim za upotrebu. Do ove degradacije dolazi zato što je magnetodielektrik B, iako predviđen da zavaruje na visokim frekvencijama, loše projektovan a modeliranjem se nije uspelo to utvrditi. Zato je ovde uveden novi numerički postupak utvrdio da dolazi do povišene tvrdoće koja cev čini nekvalitetnom. Ovu tvrdnju su autori ovog rada potvrdili i prilikom primenjenih istraživanja tako što su vršili potpuno mehaničko spljoštavanje cevi uzdužno po spoju. Dobijen je rezultat, spoj se nije deformisao a cev naspram spoja je vidno mehanički pokazala prsline. Ovim se potvrđuje korisnost izvedenih numeričkih formula koje povezuju vreme hlađenja  $t_{8,5}$ , tvrdoću  $H_{HV}$  i ekvivalent  $CE_{IIW}$ .



#### 4. DISKUSIJA

Ovaj rad se bazira na iscrpnoj i plodnoj literaturi [1-23] i primenjenim višegodišnjim istraživanjima autora ovog rada čiji je jedan deo prikazan u referencama [38-44] ovog rada. Analizom radova [24-37], koji su odabrani kao podesni sa aspekta teorije i primenjenih istraživanja, došlo se do sledećih zaključaka. Radovi uglavnom započinju iznošenjem Maksvelovih jednačina, koje se dalje ne razvijaju niti rešavaju. Ne daje se nikakav numerički doprinos već se iznosi, a dosta često i bez citiranja. Nakon toga se navode gotovi komercijalni paketi za simulaciju numeričkih podataka VF zavarivanja. Nepotrebno je i suviše navoditi teoriju ako se usvaja komercijalni paket za simulaciju i modeliranje zavarivanja.

Ne pridaje se pažnja energetske efikasnosti zavarivanja koja je danas veoma bitna, niti se primenjuje ni jedna metoda za ocenu efikasnosti. Pored nedostataka kvantitativne prirode studirani radovi ne poklanjaju pažnju ni kvalitativnom pristupu analize gotovih proizvoda.

Primećeno je da neki od autora analiziranih radova pozajmljuju rezultate drugih autora a pri tome ih ne citiraju. Tako je utvrđeno da je jedan autor rezultate autora ovog rada uvrstio u svoju doktorsku disertaciju, dok je drugi slobodno patentirao i prisvojio rezultate primenjenih istraživanja koji su zaštićeni ranije publikovanim radom u renomiranom svetskom časopisu.

Nema praćenja kvaliteta i hemijskog sastava čelične trake, tvrdoće i tehnologije deformacija čeličnih cevi. Finalna cev se ne ispituje po standardima u većini radova, već se to čini partikularno što stvara često nedoumice i pogrešne zaključke. Rezultati dobijeni simulacijama su često kontradiktorni onim koje su autori ovog rada dobili preciznim numeričkim izračunavanjima i onim iz redovne proizvodnje koje su precizno beležili.

Za razliku od proučavanih radova, autori ovog rada su najpre ovladali zavarivanjem gde se ostvaruje visoka energetska efikasnost koja je potvrđena brojnim relevantnim kriterijumima za ocenu. Ovde nije pokazana samo ušteda energije već i veza sa kasnijim kvalitetom spoja cele čelične cevi nakon kompletnog postupka zavarivanja.

Naučnim istraživanjem kroz praktične primene autori su došli do zaključka ako se ne zavaruje efikasno, tada ona energija koja se rasipa i uz dejstvo elektromagnetnog polja čine i stvara velike defekte u celoj cevi.

#### 5. ZAKLJUČAK

Rad izlaže nove pristupe i inovacije koje su istraživanjem pronašli autori ovog rada. Velike kompanije proizvođači uređaja za VF zavarivanje i druge vidove termičke obrade godinama skupljaju dragocene podatke iz prakse, ali to sve postalo je poslovna tajna. Svim tim saznanjima onemogućen je pristup istraživačima sa fakulteta, instituta i onih koji se bave naučnim radom.

Ovaj rad želi da ukaže na ove činjenice stručnoj i naučnoj javnosti, sa predlogom premošćavanja velikog jaza između teoretskih i praktičnih saznanja i invencija. To zato što su autori ovog rada imali sreću da se dugo vremena bave primenjenim istraživanjem u procesu proizvodnog procesa izrade i zavarivanja čeličnih cevi. Uz praktičan rad, proučavana je i teorija iz ove oblasti.

Rad je istražio kako se vrši kvantitativna i kvalitativna analiza. Istraživanjem je u jednom radu primećeno navođenje procentualnog učešća ugljenika u čeliku od 10% što je apsurd, a tiče se brojnih autora rada i recenzenata citiranog časopisa. Šta više, i da je štamparska greška, od 1% na 10%, što sumnjamo, i vrednost C od 1wt% je pokazatelj da se ne vlada ovom oblašću i teorijski i praktično.

Većina istraživanih radova samo razmatra spoj, misleći da će se osnovni materijal strukturno preslikati na čitavu čeličnu cev. Zato je u ovom radu pokazano do kakvih nedostataka može doći u celom preseku cevi.

Zato se rezultati svih citiranih radova u ovom radu, kao i rezultati ovog rada stavljaju na uvid i ocenu svetskoj stručnoj i naučnoj javnosti.

#### ZAHVALNOST

Zahvaljujemo stručnjacima laboratorije MIN Holdinga iz Niša koji su nam omogućili hemijsku analizu uzoraka optičkim kvantometrom. Posebnu zahvalnost dugujemo editoru časopisa Termotehnika koji je doprineo da ovaj rad bude prikazan naučnoj javnosti u ovako uglednom časopisu koji gleda unapred objavljujući najnovije rezultate iz svih vidova zavarivanja.



## LITERATURA

- [1] Simpson P.G., Induction Heating - Coil and System Design, Mc Graw Hill, 1960, New York, USA, p.304
- [2] Rudnev V., Lovelless D., Cook R., Black M., Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc., New York, 2003, p.800
- [3] Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 4, Materials and Applications, Part 1, American Welding Society, Annette O'Brien - Editor, Miami, FL, USA, 2011, p.860
- [4] Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second Edition, Wiley-Interscience, 2003, Hoboken, New Jersey, USA, p.466
- [5] N.A. Shamov, V.I. Lunin and N.V. Ivanov: High frequency metal welding, (Leningrad, Masinstroenie, 1997) p.p.3-198
- [6] D. Gulaev: Improvements of production technologies and quality of electrically welded tubes, (Kiev, Tehnika, 1984) p.p. 4-116
- [7] N.P. Gluhanov and V.N. Bogdanov: Metal welding with high frequency heating, (Leningrad, Mashgiz, 1962) p.p. 5-175
- [8] Wright J., Principles of high Frequency Induction Tube Welding, Electronic
- [9] Rudnev I.V., Induction heat treatment, Steel Heat Treatment Handbook, New York, Basel, Hong Kong, 1997
- [10] Hubbard C., "High frequency contact and induction welding of tube", FMA Journal of Fabricator, Issue January/February 1980
- [11] Electronic Heating Equipment, Inc., Impeders, Work Coils, Ferrite, Casing, 1998 Catalog applications Guide, Buckley – WA
- [12] Choong/Mzeoung Kim, POSCO, Zong-Seong Kim, Hong Ik University; Korea, Tube and Pipe Technology, January/February, 2001
- [13] Suzuki S., Takamme T., " The Formation Mechanism of White Line Welded Joints of ERW Steel Pipes", Tetsu to Hagane, Vol.40, No 10, p.p.153-159, 1984
- [14] K.Mitani, K.H. Shibuya: Impeder: How its innovation and design impacts the welding process. Proc. 8 Annual World Tube Congress ,Chicago, Illinois, 1992 p.p.25-33 Heating Equipment, Inc., Sumner, 1997
- [15] H. Schuman: Metallography, Leipzig, VEB Deutcher Verlag fur Grunstoffindustrie (1989)
- [16] Cook R.L., Lovelless D.L., Rudnev V.I., Load Matching in Modern Induction Heat Treating, Industrial Heating, Sept.1995
- [17] Lovelless D.L., Cook R.L., Rudnev V., I., Considering Nature and Parameters of Power Supplies for Efficient Induction Heat Treating, Industrial Heating, June 1995
- [18] Fluxtrol Manufacturing, Inc., MI-USA, Magnetic Flux Concentrators for High Frequency Induction Heating, MI-USA, 1996
- [19] Ruffini S.R., Nemkov S.V., Materials for Effective Magnetic Flux Control and Concentration in Induction Heating Processes, Process Controls Instrumentation, November, 1996
- [20] Ruffini S.R., Ruffini T.R., Nemkov S.V., Advanced Design of Induction, Industrial Heating, November, 1998
- [21] Ruffini R.S., Nemkov V.S., Magnetic field control and concentration induction heating coils, Centre for Induction Technology, Troy, Michigan
- [22] Fluxtrol Manufacturing, Flux Field Concentrators Solve Induction Heating Problems, Modern Applications News, Avr.-1993
- [23] Ruffini S.R., Ruffini T.R., Nemkov S.V., Advanced Design of Induction, Industrial Heating, November, 1998
- [24] 1.Ruffini R.S., Ruffini P.T., Nemkov V.S., Goldstein R.S., Computer Simulation for Unduction Heat Treating of Automotive Parts, Global Power Train Congress, 1998, Detroit, Mi-USA s
- [25] V.Nemkov, R.Goldstein, J.Jackowski, N.Vyshinskaya, C.Yakey, Temperature prediction and thermal management for composite magnetic controllers of induction coils, Fluxtrol Inc., Michigan 48326, (2008), USA
- [26] Nemkov V., Ruffini R., Madeira R., Vyshinskaya N., Magnetic Flux Control in Induction Heat Treating. (2009), Proc. ASM Int. Conference, Indianapolis, USA
- [27] Ruffini R.T., Nemkov V.S., Goldstein R.C., Magnetic Flux Controllers-New Materials, New Opportunities, ASTRA 2003, November 3-6, 2003, Hyderabad, India
- [28] Ruffini R.T., Nemkov V.S., Vyshinskaya N., New Magnetodielectric Materials for Magnetic Flux Control, Heavy Wall Pipe Seam Annealing, HES 2004, MI, USA



- [29] V.Nemkov, Goldstein R., Bukanin V., Optimal Design of Internal Coils, Centre for Induction Technology, Inc. MI 48326, USA
- [30] Nemkov V., Magnetic flux guide for continuous high frequency welding of closed profiles (2008), Int.Patent.No. PCT-US 2008/007390
- [31] S.V.Nemkov, Tube Welding with Fluxtrol Magnetic Materials, Tube and Pipe Show, Dusseldorf, April 2008
- [32] Han Y., Yu E.L., Numerical Analysis of High-Frequency Induction Welded Pipe, Welding Journal, Vol.91, October 2012, p.270-277
- [33] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Liebeherr M.,Bahdeshia H.K.D.B., Tackling the Toughness of Steel Pipes Produced by High Frequency Induction Welding and Heat-Treatment, Materials Science and Engineering:A, Vol.528, Iss.29-30, 15 Nov. 2011, p.8492-8499
- [34] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Bahdeshia H.K.D.B., Induction welding and heat treatment of steel pipes:evolution of crystallographic texture determinantal to toughness, Science and technology of welding and joining, 2010, vol.15, no.2, p.137-141
- [35] Yan P.,Gunger O.E.,Thibaux P.,Bahdeshia H.K.D.B., Crystallographic texture of induction welded and heat treated pipeline steel, Advanced Materials research, Vols 89-91, 2010 p.651-656
- [36] .Iatcheva I.,Gigov G., Kunov G., Stancheva R., Analysis of Induction Heating System for High Frequency Welding, Facta Universitatis, Ser.Elec.Energ.Vol.25, No 3, Dec.2012, p.183-191
- [37] Spahiu A., Experimental Study of the Induction Heating Manufacturing of Metallic Tube by Longitudinal Welding process, U.P.D. Sci.Bul.Series C, Vol.69, No 2, 2007, p.37-48
- [38] Milićević M., Milićević V., Optimisation of energetic parameters and quality HF inductive welding steel pipei, 11th International Symposium POWER ELECTRONICS Ee2001 Novi Sad, Serbia, 31.10.-02-11-2001, Novi Sad
- [39] M. Milicevic and V. Milicevic: Impeder for HF Inductive Welding of Steel Tubes, IEE Proceedings, Science, Measurement and Technology, vol.149. No.3, May 2002, p.p. 113-116
- [40] Milićević M.: Possible Defects of the High Frequency Inductive Welding of the Steel Tubes by Applying a Ferrite Impeder, 39<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Soko Banja, Serbia & Montenegro, 2007, pp.318-333
- [41] Milićević M. and Milićević T.: New Solution for Improvement of Parameters and Quality of HF Inductive Welding of Steel Tubes, 37<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia & Montenegro, 2005, pp.466-475
- [42] M. Milicevic, V. Milicevic and T. Milicevic: MDM Impeder for Improvement of Parameters and Quality of HF Inductive Welding, 36<sup>th</sup> *International October Conference on Mining and Metalurgy* (Bor, Serbia and Montenegro)(2004)p.p. 531-537
- [43] Milićević M., The Application of a New Formula of Nakaoka Coefficient in HF Inductive Welding, *Journal of Mechanical Engineering* 56 (2010), 7-8, 483-488, UDC 621.791.7.004.942
- [44] M. Milicevic and Z. Radakovic: Quality Improvement of Steel Pipes by Seam Welding with New Magneto-Dielectric Impeder, *Materials Transactions*, Vol.47 No.06(2006), The Japan Institute of Metals, Japan, p.p. 1464-1468
- [45] Nolan D., Sterjovski Z. and Dunne D., Modelling of HAZ Hardness in C-Mn Pipeline Steels Subjected to in-Service Welding Procedures, IIW Document No. IX-2165-05, Wolongong, Welding Technology Institute, 2005
- [46] Nolan D., Bruce W., Grace P., Dunne D., Weldability issues for in-service pipeline welding, Proc. of the International Conference on Pipeline reairs and In-Service Welding, Wolongong, 2003, Published by the Welding Technology Institute of Australia, 2003