



ZAVARIVANJE I



ZAVARENE KONSTRUKCIJE WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 70 Vol. 70	Br. 3 No. 3	97-192 97-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2025. 2025.
--------------------	----------------	------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U
SRBIJI I TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU

SERBIAN WELDING SOCIETY AND FACULTY OF TECHNOLOGY
AND METALLURGY OF THE UNIVERSITY OF BELGRADE
QUARTERLY REVIEW

PERIODIČNOST IZLAŽENJA – ČETIRI PUTA GODIŠNJE
PUBLISHED IN FOUR ISSUES ANNUALLY

IZDAVAČI / PUBLISHERS

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

Grčića Milenka 67, Beograd, Srbija

**TMF - Tehnološko-metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu**
Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

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)

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, zoranodanovic@gmail.com

Tehnički urednici / Technical Editors

Branislav Lukić, dipl.ing

štampano izdanje / printed edition

Dr Bojan Gligorjević, dipl.ing

internet izdanje / online edition

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Srđan Bulatović, dipl.ing.

Dr Stefan Dikić, dipl.ing.

Mr 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)

duzs011@gmail.com

www.wwsjournal.org.rs



CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije : časopis Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji i Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu = Welding & welded structures : Serbian welding society and Faculty of Technology and metallurgy of the University of Belgrade quarterly review / glavni i odgovorni urednik Zoran Odanović. - Vol. 41, no. 1 (1996) - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji : TMF - Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996- (Beograd : RIC grafičkog inženjerstva Tehnološkometalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu). - 29 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Zavarivač = ISSN 0513-8523. - Drugo izdanje na drugom medijumu: Zavarivanje i zavarene konstrukcije (Online) = ISSN 3042-3163 ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUŽBINA ZA 2025.

Cena pojedinačnog broja 1,150,00 dinara
Godišnja pretplata 3,520,00 dinara
Tekući račun: 325-950060002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546
OTPVRS22 (VOJVODANSKA BANKA AD)
IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINT

RIC grafičkog inženjerstva
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Karnegijeva 4, Beograd
Tiraž / Circulation: 150

70 GODINA ČASOPISA

70 GODINA ČASOPISA
ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE
HRONOLOŠKI PRIKAZGLAVNI I ODGOVORNI UREDNICI ČASOPISA
ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE TOKOM
70 GODINA POSTOJANJA ČASOPISAFAKTORI KOJI USLOVLJAVAJU KVALITETNO
TAČAKASTO ZAVARIVANJE LAKIH LEGURA

Reprint rada - Zavarivač broj 1, (1955), str. 3 – 9.

Stanislav Mišković

UTICAJ GREŠAKA NA JAČINU ZAMORA SUČEONOG
ZAVARENOSTI SPOJA

Reprint rada - Zavarivač broj 1, (1967), str. 3 – 17.

Milan Radojković

RAZVOJ ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE
KONSTRUKCIJEReprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije,
broj 3, (2005), str. 141-146.

Stojan Sedmak

100-152



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

DIREKTNO MERENJE J INTEGRALA –
RETROSPEKTIVA

Aleksandar Sedmak

154



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

MIKROSTRUKTURA, SPECIFIČNA ELEKTRIČNA
PROVODLJIVOST I INTERKRISTALNA KOROZIJA
ZAVARENOSTI SPOJEVA LEGURA
AA6026/AA5183/AA6026 NAKON PULSNOG
ZAVARIVANJA I NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE

Bojan Gligorijević, Vencislav Grabulov, Endre Romhanji

163



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

ODRŽIVA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIH SPOJEVA OD
PUNE ŽICE: ULTRAZVUČNO ZAVARIVANJE
NASPRAM LEMLJENJAAndraž Logar, Damjan Klobčar, Aleš Nagode, Uroš Trdan, Gregor Černivec, Matija Bušić, Miodrag Milčić, Dragan Milčić,
Nataša Zdravković, Tomaž Vuherer, Aleksija Đurić

174



STANDARDIZACIJA I KVALITET

PREGLED NOVE UREDBE O GRAĐEVINSKIM
PROIZVODIMA I KONSTRUKCIJAMA 2024/3110

Vojin Milić, Andrija Drča

184



VESTI

153

3. MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNO SAVJETOVANJE „ZAVARIVANJE SPAJA“, MOSTAR, 22.24.10.2025.

162

KONFERENCIJA O CEVOVODIMA I REZERVOARIMA, 5-6. NOVEMBAR 2025., FORT VORT, TEKSAS, SAD

173

MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU TRENJEM (IFWC), 19-21 MAY 2026 TWI LTD, GRANTA
PARK, GREAT ABINGTON, CAMBRIDGE CB21 6AL

188

ICWET 2026: 20. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O INŽENJERSTVU I TEHNOLOGIJI ZAVARIVANJA, 30-31.
MART 2026. U PARIZU, FRANCUSKA

189

72. GODIŠNJA SKUPŠTINA DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI, BEOGRAD, 26.06.2024.

192

MARKETING

70 YEARS OF THE JOURNAL

ZAVARLJIVI FINOZRNI ČELICI

Reprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije,
broj 4, (2006), str. 155 - 164.

Mirjana Smiljanić

ZNAČAJ IZBORA MATERIJALA PRI ZAVARIVANJU I
PRIMER NENAMENSKE UPOTREBE
HARTFIELDVOG ČELIKAReprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije,
broj 3, (2004), str. 119 - 121.

Milica Antić

NUMERIČKA SIMULACIJA TOPLOTNOG REŽIMA
PROCESA ZAVARIVANJA ČELIKAReprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije,
broj 1, (2002), str. 3 - 8.

Zoran. Odanović

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

DIRECT MEASUREMENT OF J INTEGRAL – A
RETROSPECTIVE

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

MICROSTRUCTURE, ELECTRICAL CONDUCTIVITY,
AND INTERGRANULAR CORROSION OF
AA6026/AA5183/AA6026 ALLOY WELDED JOINTS
AFTER PULSED WELDING AND POST-WELD HEAT
TREATMENT

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

SUSTAINABLE FABRICATION OF SOLID-WIRE
ELECTRIC CONTACTS: ULTRASONIC WELDING VS.
SOLDERING

STANDARDIZATION & QUALITY

REVIEW OF THE NEW CONSTRUCTION PRODUCTS
REGULATION 2024/3110

NEWS

Poštovani čitaoci,

Prethodne godine donele su nam puno neizvesnosti i izazova koji su direktno uticali na naš svakodnevni život i rad. Pored svih ovih turbulentnih događanja u svetu i kod nas, upravo ove godine dogodio se jedan značajan jubilej, a to je da naš časopis **Zavarivanje i zavarene konstrukcije** slavi sedamdesetu godinu izlaženja. Od samog osnivanja, misija časopisa je bila da se objavljuju stručni i naučni radovi koji ne samo da unapređuju oblast zavarivanja, već i da povezuju i inspirišu buduće generacije zavarivača. Časopis nam je omogućavao saradnju i kontakt sa kolegama iz našeg bližeg i daljeg okruženja, razmenu znanja i iskustava i posebno pružao informacije o novim: naučnim, stručnim i tehničko - tehnološkim dostignućima iz oblasti zavarivanja, na međunarodnom i domaćem nivou.

Tokom svih ovih 70 godina, časopis je opstao kroz brojne uspone i padove. Njegov uspeh duguje se entuzijazmu, predanosti i ljubavi svake generacije članova Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, kao i svih onih koji su voleli časopis. Izražavamo najdublju zahvalnost autorima, recenzentima i čitaocima iz zemlje i inostranstva, koji su bili sastavni deo našeg putovanja. I dalje ostajemo posvećeni osnovnim principima časopisa, a to su otvorenost i saradnja. Uvereni smo i nadamo se da će u narednim godinama i decenijama ova misija časopisa nastaviti da živi.

Ovaj broj časopisa čine dva dela. Prvi deo posvećen je jubileju časopisa i sadrži reprinte radova, koje su glavni i odgovorni urednici objavljivali tokom proteklih sedam decenija, a koje smo uspeali da nađemo u našoj arhivi. Drugi deo ovog broja čini standardni sadržaj časopisa sa uobičajenim rubrikama.

Srećan 70. rođendan!

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



70 GODINA ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE HRONOLOŠKI PRIKAZ

Povodom 70. godišnjice časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije podsetićemo na značajne događaje i periode koji su obeležili njegov put do današnjih dana.

Prapočetak časopisa je Zavarivač, koji je zajednički časopis Društva na unapređenje zavarivanja NR Srbije i Društva za tehniku zavarivanja NR Hrvatske tokom 1954.-1955. godine.

Godina 1955.

U drugoj polovini 1955. časopis Zavarivač izdaje DUZ NR Srbije, i hronološki je to godina od koje se računa volumen časopisa. Glavni i odgovorni urednik je ing. Stanislav Mišković.

Godina 1958 – 1960.

Časopis Zavarivač izdaje DUZS (Beograd), ali je to glasilo četiri republičke zavarivačke asocijacije (Srbije, Hrvatske, BiH i Makedonije), članice Saveza društava za tehniku zavarivanja Jugoslavije (SDTZJ). Glavni i odgovorni urednik je Prof. ing. Milan Radojković.

Godina 1961 – 1969.

Donet je Poslovnik o radu časopisa Zavarivač kojim se utvrđuje da je osnivač časopisa DUZS, izdavač i pravni subjekt, a da ostala republička društva koja ga prihvataju kao svoje glasilo imaju obavezu da određen broj primeraka plasiraju na svojoj teritoriji. Kao svoje glasilo časopis su prihvatile republičke asocijacije BiH i Makedonije, a od 1967. i asocijacija Crne Gore.

Godina 1969 – 1975.

Izdavači časopisa Zavarivač su republička društva koja su ga prihvatila kao svoje glasilo, a suizdavači su privredne organizacije (Energoinvest - Sarajevo, Termoelektro - Beograd, Zavod za zavarivanje - Beograd) koje pružaju finansijsku podršku. Od 1973. godine u impresumu se naznačava da je to časopis Saveza društava za tehniku zavarivanja Jugoslavije (SDTZ).

Godina 1975 – 1980.

Izdavač časopisa Zavarivač je samo DUZS, a suizdavači su republička društva koja su ga prihvatila kao svoje glasilo, kao i privredne organizacije iz Srbije (stalni suizdavač je bio Zavod za zavarivanje - Beograd) koje ga finansijski podržavaju. Izdavanje dotira Republička zajednica za nauku Republike Srbije. Od 1978. glavni i odgovorni urednik je Ing. spec. zav. Dragoslav Macanković.

Godina 1980 – 1989.

Od polovine 1980. zaključno sa 1989. izdavači časopisa Zavarivač su republička društva Srbije, BiH, Makedonije i Crne Gore, a suizdavači privredne organizacije sa celog područja Jugoslavije. Časopis dotiraju SIZ za nauku republika izdavača. U 1985. uspostavlja se Izdavački savet, kao nadzor nad uređivačkom politikom časopisa. Prezentacija naučnih i stručnih radova je prema pravilima za naučno - stručne publikacije. Počev od 1989. glavni i odgovorni urednik je Prof. dr. Stojan Sedmak, dipl.ing.

Godina 1990.

DUZ Crne Gore svojom voljom prestaje da bude jedan od izdavača, dok asocijacije BiH i Makedonije ostaju do kraja te godine izdanja, odnosno do kraja članstva u JSZ. Time, de facto, časopis je samo časopis DUZS.

Godina 1991 – 1995.

Izdavač časopisa Zavarivač je DUZS, a suizdavači privredne organizacije: Zavod za zavarivanje - Beograd i Yuweld-Beograd. Povremeno časopis dotira Ministarstvo za nauku Srbije i Savezne republike Jugoslavije. U uređivanju časopisa, za autorske radove koji se visokostručno kotiraju, uvodi se dvojezični tekst (srpski-engleski), što ga još dodatno u karakteriše kao naučno - stručni časopis.

Godina 1996.

Časopis Zavarivač menja naslov u Zavarivanje i zavarene konstrukcije / Welding & Welded Structures. Time je usaglašen naslov sa sadržajem i namenom časopisa. Izdavač i suizdavači su kao u prethodnom periodu.

Godina 2001 - 2003.

Časopis Zavarivanje i zavarene konstrukcije izdaje DUZS, bez suizdavača. Uspostavljaju se pravila sistema kvaliteta u uređivanju časopisa. Glavna i odgovorna urednica je Mirjana Smiljanić. Činom ukidanja JSZ decembra 2003. časopis Zavarivanje i zavarene konstrukcije je i de jure časopis DUZS, što je naznačeno u impresumu.

Godina 2004 – 2020.

Od broja 2, glavni i odgovorni urednik je Dr. Zoran Odanović, a od 2011 - 2013. godine glavna i odgovorna urednica časopisa je Ljiljana Peković i od 2014 - 2020. godine glavna i odgovorna urednica časopisa je Milica Antić, dipl.ing.

Godina 2020 - 2025.

Počev od broja 3, glavni i odgovorni urednik časopisa je ponovo Dr. Zoran Odanović. Časopis dobija elektronsku verziju i odgovarajući eISSN broj, suizdavač časopisa postaje Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu i časopis dobija novu savremenu verziju web sajta na adresi: www.wwsjournal.org.rs.



GLAVNI I ODGOVORNI UREDNICI ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE TOKOM 70 GODINA POSTOJANJA ČASOPISA

Poštovane kolege, saradnici i čitaoci našeg strukovnog časopisa *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* pokušaćemo da prikazemo ličnosti glavnih i odgovornih urednika časopisa koji su dali svoj doprinos tokom 70 godina postojanja časopisa i to ne samo njegovom nastanku, već opstanku i razvoju do modernog, savremenog naučno - stručnog časopisa, kakav je danas. Profesionalni, a pogotovo volonterski rad na tom poslu, uvek zahteva veliki rad i odgovornost za pisanu reč. Ako tome dodamo da su glavni i odgovorni urednici našeg časopisa i prvi recenzenti, redaktori i lektori, posle velikog rada zadovoljstvo je kratkotrajno, kada broj izađe iz štampe, a zatim ubrzo sledi rad na sledećem broju. Rezultate tog rada ocenjuju prvenstveno čitaoci, a najviše, vreme postojanja časopisa. Sudeći po ovom jubileju, glavni i odgovorni urednici su uspešno prošli proveru svog rada i rada svojih saradnika.

Svaka personalna promena na funkciji glavnog i odgovornog urednika donosila je i pomake u osavremenjavanju časopisa, u skladu i sa tehničkim napretkom pripreme i štampe. Ograničenja su uvek, pa i sada prisutna, uslovljena finansijskim mogućnostima. Pored onoga što je uslovljeno vremenom i novcem, pažljivi čitalac će primetiti nijansirane promene koje unosi glavni i odgovorni urednik, shodno svojim specifičnim afinitetima prema ovoj vrsti posla.

Od druge polovine 1955. godine, od kada se računa volumen časopisa, pa sve do 1996. godine naslov časopisa je bio Zavarivač. Izmena naslova u Zavarivanje i zavarene konstrukcije 1996. godine deo je njegovog razvojnog puta i usaglašavanja sa dugogodišnjom programskom orijentacijom. Od osnivanja pa sve do 1991. godine časopis Zavarivač je u najvećem periodu glasilo Saveza društava za tehniku zavarivanja (SDTZ), odnosno Jugoslovenskog saveza za zavarivanje (JSZ), zavarivačkih asocijacija Srbije, BiH, Makedonije i Crne Gore, a od 1991. samo DUZS. Od 2004. godine, gašenjem JSZ, časopis Zavarivanje i zavarene konstrukcije je glasilo DUZS. Tokom 70 godina, bez obzira na sve varijacije pripadnosti, izdavača i suizdavača, i postojanja redakcija izdavača, krajnja briga o uređivanju časopisa i njegovom izdavanju je u nadležnosti glavnog i odgovornog urednika i redakcije DUZS u Beogradu i to je nit koja povezuje sva izdanja časopisa.

1955 - 1957. godine

potpukovnik Stanislav Mišković, dipl. ing.

O prvom glavnom i odgovornom uredniku potpukovniku Stanislavu Miškoviću, dipl. ing. nema dovoljno informacija, niti fotosa. Bio je jedan od pokretača osnivanja i prvi potpredsednik DUZS, glavni i odgovorni urednik BILTENA, prvog glasila DUZS, koji je izlazio 1953-1956. godine, te ga možemo smatrati pionirima naše zavarivačke periodične publicistike.

1958 - 1978. godine

Profesor Milan Radojković, dipl. ing. građ.

Prof. Milan Radojković je bio izuzetna ličnost tog vremena, u svim područjima svog širokog delovanja: projektant prvih železničkih mostova kao zavarenih konstrukcija; prvi ispitivač konstrukcija i osnivač laboratorije za ispitivanje konstrukcija; istraživač u području primene eksperimenta u analizi napona i sigurnosti konstrukcija; pedagog i društveno anagažovana javna ličnost.

Prof. Milan Radojković je nesumnjivo doajen srpskog i jugoslovenskog zavarivanja kao tehnološke discipline. Inicijator je i jedan od osnivača DUZS i prvi predsednik (1952-1960. godine); predsednik SDTZ Jugoslavije (1957-1960. godine) i potpredsednik IIW u dva mandata (1958-1960. i 1974-1976. godine).

Prvi je direktor Zavoda za tehniku zavarivanja; osnivač u nas prvih poslediplomskih - specijalističkih studija iz zavarivanja, pokretač izdavanja stručnih zavarivačkih publikacija. Za priznanje njegovog izuzetnog doprinosa razvoju zavarivanja, JSZ je uspostavio Medalju "Milan Radojković". Na nama je da priznanje sa



njegovim imenom nastavimo, kao što smo nastavili i sa izdavanjem časopisa, kome je prof. Radojković postavio temelje.

Već 1961. godine donet je Pravilnik o radu časopisa Zavarivač u kojem se naznačava da je osnivač DUZS, a predviđeno je da izdavači mogu da budu i druge zavarivačke asocijacije koje ga prihvataju kao svoje glasilo. Za ličnosti kao što je prof. Radojković uske su sve granice koje ograničavaju ljudsko stvaralaštvo, i u tom smislu delovanje M. Radojkovića je, pre svega, bilo usmereno na uspostavljanje jedinstvenog časopisa na prostoru Jugoslavije. Rezultat ove borbe, uz dosta kompromisa, usledio je 1972. godine od kada je časopis Zavarivač glasilo JSZ, a izdavači / suizdavači asocijacije Srbije, BiH, Makedonije, Crne Gore, ali stabilnost dogovora je vidljiva tek 80-tih godina.

Struktura časopisa koju je uspostavio M. Radojković zadržana je i do danas. U tadašnjim nazivima prepoznajemo sadašnje osnovne rubrike: nauka i istraživanje, praksa, IIW, vesti. Ceneći značaj pisane reči, u časopisu je zastupljeno uspostavljanje naše zavarivačke terminologije.

1979 - 1988. godine

Mr Dragoslav Macanković, dipl. ing. el. teh.

Mr Dragoslav Macanković je pripadao generaciji prvih visoko obrazovanih inženjera za zavarivanje, a svoj stručni, istraživački, obrazovni i društveni rad apsolutno je posvetio zavarivanju. Za uspešnu profesionalnu zavarivačku aktivnost imao je najviše obrazovne reference, stečene u prestižnoj francuskoj školi zavarivanja Ecole superieure de soudure autogene (1963/64). Godine 1969 /1970. ponovo je u Institutu za zavarivanje u Parizu, gde radi na istraživanju pojave prslina pri zavarivanju čelika povišene i visoke čvrstoće. Objavio je veliki broj stručnih radova na međunarodnim skupovima i u časopisu. Kreirao je programe i bio fascinantant predavač na kursevima svih nivoa obrazovanja zavarivačkog osoblja.

Od polovine 80-tih godina časopis se uređuje shodno pravilima za naučno-stručne publikacije: kategorizacija autorskih radova, ključne reči, dvojezični izvodi, UDK klasifikacija. Korice se štampaju u višebojnoj tehnici, godišta izdanja su prepoznatljiva, a unutrašnje strane korica su kolor oglasi. Osim već ustaljene strukture časopisa, značajna pažnja se posvećuje predlozima jugoslovenskih standarda iz oblasti zavarivanja, bibliografiji - prikazu sadržaja inostranih časopisa za zavarivanje, prikazu tehničkih vesti iz inostranstva - novih proizvoda i novih tehnologija.

U obezbeđenju autorskih radova D. Macanković je imao pomoć redakcija republičkih asocijacija, uglavnom BiH i Makedonije. Međutim, značajno je bilo i njegovo poznavanje i komuniciranje sa skoro svim ličnostima koje su nešto značile u zavarivačkoj sferi širom Jugoslavije. Smisao za druženje omogućio mu je i stabilan sastav i rad redakcije u Beogradu. Ovde svakako treba pomenuti njegove bliske saradnike i urednike: Delić Božidara, Nikolić Miroslava, Vojnović Vladu i Nedeljković Ljubomira, koji su nastavili da rade i u redakciji prof. Stojana Sedmaka, i time doprineli kontinuitetu uređivanja časopisa. Dragan Macanković se krajem 1988. godine, verovatno iz zdravstvenih razloga, povukao. Stručno, jezički i terminološki merio svaku napisanu reč i sa profesionalnom odgovornošću je uređivao časopis.

1989 - 2000. godine

Profesor dr Stojan Sedmak, dipl. ing. mašinstva

Prof. dr Stojan Sedmak je svoju profesionanu karijeru započeo u vojnoj industriji (1954-1966), da bi se od 1966. godine posvetio pedagoškom radu na TMF u Beogradu i bogatom naučnom radu u oblasti teorije mehanike loma, pouzdanosti materijala i oceni sigurnosti konstrukcija. Poseban naučni doprinos S. Sedmaka i njegovih saradnika je u analizi ponašanja prslina u zavarenim spojevima i oceni integriteta zavarenih konstrukcija primenom parametara mehanike loma. Zahvaljujući radu i dostignućima S. Sedmaka, mehanika loma i analiza integriteta konstrukcija su uvedene i utemeljene u našoj zemlji, što je omogućilo i intenzivnu institucionalnu međunarodnu saradnju u ovoj naučnoj oblasti. Rezultati njegovog rada i rada njegovih saradnika pretočeni su u nacionalne i međunacionalne istraživačke projekte, u učešće na velikom broju konferencija i skupova u zemlji i inostranstvu, i u preko 190 objavljenih naučnih radova. Autor je sedam knjiga i udžbenika i editor devet monografija, od kojih dve na engleskom jeziku.



Osim pedagoškog rada kao redovnog profesora, pokretač je poslediplomskih magistarskih studija iz zavarivanja, mentor 17 doktorskih disertacija i 14 magistarskih teza, od kojih tematski mnoge ulaze u područje zavarivanja, čime je doprineo razvoju naučno istraživačkog rada na području ispitivanja ponašanja materijala pri zavarivanju.

U stručnom radu zavarivačke asocijacije S. Sedmak je bio angažovan kao predsednik nacionalne komisije i član IIW Komisije X (1978-2000.godine). Od 1990-2000. godine intenzivno je angažovan u radu organa upravljanja DUZ/JSZ: potpredsednik i predsednik DUZS (1990-1996) i predsednik JSZ (1996-2000).

Za glavnog i odgovornog urednika časopisa Zavarivač izabran je u najkritičnije vreme za DUZS i najnepovoljnije za izdavanje časopisa. Prvih godina redakcija časopisa je ujedno i volonterska administracija, i praktični realizator mnogih aktivnosti DUZS koje pokreće S. Sedmak. Od 90-tih uvodi kompjutersku pripremu za štampu časopisa angažujući asistente i studente sa TMF, a u okviru redakcije, da bi tokom vremena kompjuterska grafika i kompjuterska priprema postale nerazdvojni element redakcijske aktivnosti. U uređivanju časopisa, za autorske radove koji se visokostručno kotiraju, uvodi dvojezični tekst (srpski-engleski), što dodatno, u tom segmentu (rubrika nauka-istraživanje-razvoj), daje časopisu naučno-stručni karakter.

Od 1996.godine izvršena je preregistracija naslova časopisa u Zavarivanje i zavarene konstrukcije, čime je usklađen sadržaj i naslov časopisa i konačno data odrednica da je namenjen onima koji se bave razvojem i industrijskom primenom zavarivanja, odnosno tehnološkim disciplinama čija kompleksnost zahteva viši tehnički obrazovni nivo i saradnika i čitalaca. Pri tome, zadržane su sve one rubrike koje su namenjene neposrednoj inžinjerскоj praksi.

2001 - 2004. godine

Mirjana Smiljanić, dipl. ing. metalurgije

Mirjana Smiljanić dipl. ing. metalurgije, inženjer specijalista zavarivanja skoro ceo radni vek bavila se problematikom primene termičke obrade i zavarivanja metalnih materijala. Usmerenost na ove tehnološke discipline je zbog njihove pogodnosti za eksperiment i proveru rešenja u industrijskoj proizvodnji, za šta su pružale mogućnost obe firme u kojima je radila – Zavodi “Crvena zastava” - Kragujevac i “Zavod za zavarivanje” - Beograd. Osim značajnog broja objavljenih ili izlaganih stručnih radova, autor je pet stručnih publikacija, urednik edicije Praksa, autor i/ili stručni redaktor skripti za tematske seminare, škole reparaturnog zavarivanja, za kurs za IIW/EFW inženjere zavarivanja. Dugo vremena je bila aktivni učesnik komisije za JUS standarde iz oblasti dodatnih materijala za zavarivanje, i još duže u Komisiji za materijale i zavarivanje Jugoslovenskog registra brodova.

Sa manjim prekidima, od 1988. pa sve do kraja 2000. godine, bila je član redakcije, pomoćnik glavnog i odgovornog urednika, urednik rubrike. Uočene probleme izdavanja i uređivanja časopisa iz tog perioda, u velikom stepenu uslovljene nedovoljnom aktivnošću UO DUZS na rešavanju sistemskih pitanja, pokušala je da reši u funkciji glavnog i odgovornog urednika.

Počev od 2002. godine jedini izdavač časopisa je DUZS, a odgovorno lice ispred izdavača je predsednik DUZS. Od 2004.godine časopis je i de jure glasilo DUZS. U nepostojanju bilo kakvih pisanih pravila, što je ponekad korišćeno i na štetu časopisa, a uglavnom omogućavalo improvizacije, smatrala je da je neophodno dokumentovano uspostavljanje sistema rada, nezavisno od promena upravljačkih izbornih tela i funkcija strukovne asocijacije i časopisa. Pošto nije postojao čak ni Poslovník, koji je donet davnih 60-tih godina, pripremljen je nacrt Poslovnika o izdavanju časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije, dokumenta JSZ, koji, iako usvojen, nije bio potpisan sve do momenta gašenja JSZ. Zatim sledi donošenje dva osnovna dokumenta DUZS kao izdavača: procedure Izdavačka delatnost DUZS i procedure. Poboľšane su tehničke mogućnosti sopstvene kompjuterske obrade i pripreme teksta za štampu. Uvedene su novine u grafičkoj prezentaciji rubrika, a posebna pažnja je posvećena dizajnu korica, kao važnom elementu za prvi utisak o časopisu. Strogo je poštovana dinamika izlaženja časopisa koja obezbeđuje pravovremenu informaciju, posebno u delu strukovnih vesti, ali koja zahteva kontinualan rad, kako glavnog i odgovornog urednika, tako i članova redakcije. Stručnom nivou časopisa, pored saradnika autora, svakako su doprineli: kao recezent dr Aleksandar Radović i Milica Antić, kao prevodilac IIW dokumenata i vesti iz inostranih časopisa.

**2011 - 2013. godine****Ljiljana Peković, dipl. ing. mašinstva**

Ljiljana Peković diplomirani inženjer mašinstva, završila je smer Mehanizacija i transportne mašine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu i inženjer je zavarivanja po programu u skladu sa propisima Evropske federacije i Međunarodnog Instituta za zavarivanje. Ljiljana Peković je vlasnik agencije Promekon, a radila je i kao šef predstavništva MIP-a i stručni saradnik za koordinaciju komercijalno - tehničkih poslova MIP-a. Bila je urednica časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije" u periodu od 2011 - 2013. godine.

2013 - 2020. godine**Milica Antić, dipl. ing. metalurgije**

Milica Antić, dipl. ing. metalurgije, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, smer metalurgija obojenih metala završila je 1979. godine, a diplomu evropskog inženjera zavarivanja dobila je 1981. godine. Radila je u Zavodu za zavarivanje u Beogradu, gde je bila i direktor istraživačko razvojne jedinice i rukovodilac grupe za obrazovanje i obuku. Do penzionisanja 2018. godine radila je kao inženjer metalurgije i u Institutu Goša, Beograd i u Kontrol Inspektu, Beograd.

Bila je aktivan član mnogih strukovnih udruženja. Član Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji bila je više od 30 godina, s tim da je bila član Upravnog Odbora DUZS u više mandata, a predsednik DUZS od juna 2010. – aprila 2011. godine. Takođe je bila i član Srpskog društva za ispitivanje bez razaranja. Od 1989. do 1992. godine bila je član redakcije časopisa "Zavarivač", a kasnije "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", od 2001. Do 2006. godine. Od 2013. do 2020. bila je glavni i odgovorni urednik časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije".

Aktivno je učestvovala u organizaciji mnogih konferencija: međunarodnih, nacionalnih sa međunarodnim učešćem i nacionalnih, kao i raznih seminara i savetovanja. Kao autor ili koautor objavila je preko dvadeset radova na međunarodnim i domaćim konferencijama i u časopisima. Koautor je dve monografije: Termička obrada zavarenih spojeva i Reparaturno zavarivanje delova od sivog liva u izdanju DUZS, Beograd,

Jedan je od osnivača Nacionalnog tela za ovlašćivanje u delu obrazovanja kadrova u zavarivanju po pravilima Međunarodnog instituta za zavarivanje – IIW i Evropske federacije za zavarivanje, rezanje i srodne tehnologije. Obavljala je značajnu ulogu u organima DUZS-CertPers-a, kao član ispitnih komisija, predavač na kursevima, ocenjivač DUZS-CertPers-a i kao rukovodilac dela za sertifikaciju osoblja po pravilima Međunarodnog instituta za zavarivanje. Bila je entuzijasta, zaljubljenik u zavarivanje, ponosna na to što je inženjer, metalurg, ali i žena koja je u muškom zanimanju bila podjednako uvažavana i čije se mišljenje visoko cenilo.

2004 - 2011. i od 2020 – 2025. godine**Dr Zoran Odanović, dipl. ing. metalurgije**

Dr Zoran Odanović, dipl. ing. metalurgije, je na Tehnološko metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za metalurgiju gvožđa i čelika diplomirao, magistrirao i doktorirao. Tokom svoje karijere radio je u Institutu za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina ITNMS - Beograd; Vojnotehničkom institutu VTI – Beograd i Institutu za ispitivanje materijala IMS - Beograd. Naučno istraživački rad dr Z. Odanovića obuhvatao je oblasti topljenja, livenja, plastične prerade, termičke obrade, zavarivanja i strukturno mehaničkog ispitivanja kako visoko legiranih i čelika visoke čvrstoće, tako i konstrukcionih čelika i obojenih metala.

U okviru naučno – nastavnog rada je na Katedri za metalurgiju gvožđa i čelika na Tehnološko metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, radio je u jednom periodu kao honorarni asistent, a zatim i kao docent na redovnim i poslediplomskim studijama na predmetima Metalurgija gvožđa, Metalurgija specijalnih čelika i Metalurgija zavarivanja čelika. Takođe je predavač na kursevima za internacionalne inženjere i tehnologe zavarivanja.



Od naučnih zvanja ima status Naučnog savetnika. Naučno istraživački rad dr Z. Odanovića pretočen je u preko 200 radova, objavljenih u inostranim i domaćim časopisima ili izlaganih na konferencijama i ima značajan broj citatata od preko 540, što ukazuje na veliki uticaj njegovih radova u oblastima metalurgije, zavarivanja i analize loma metala.

Bio je član redakcionog odbora u časopisu "Metalurgija", Beograd, a glavni i odgovorni urednik časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije" bio je od 2004 – 2010. godine. Ponovo je od 2020 – 2025. godine glavni i odgovorni urednik časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije". U tom periodu časopis dobija elektronsku verziju i odgovarajući eISSN broj, suizdavač časopisa postaje Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Časopis dobija i novu savremenu verziju internet sajta čime je povećana dostupnost sadržaja časopisa i omogućava povećanje broja čitalaca i na širem, ne samo bliskom jezičkom području.

Umesto zaključka

Priča o sedamdesetoj godini izdavanja časopisa "**Zavarivanje i zavarene konstrukcije**" nije samo hronologija izdanja, već svedočanstvo o posvećenosti i viziji niza izuzetnih ličnosti. Svaki glavni i odgovorni urednik – od pionira Stanislava Miškovića i doajena zavarivanja Milana Radojkovića, preko stručnjaka Dragoslava Macankovića i profesora Stojana Sedmaka, do praktičara Mirjane Smiljanić i Milice Antić, kao i Zorana Odanovića – ostavio je neizbrisiv trag. Oni su bili ne samo urednici, već i recenzenti, redaktori, ali pre svega čuvari kvaliteta i kontinuiteta časopisa.

Uspešno su prolazili kroz brojne izazove, ne samo menjajući naslov i prilagođavajući se tehničkom napretku, već i gradeći časopis koji je služio kao most između nauke i prakse i između generacija stručnjaka. Vremena su se menjala, ali su osnovne vrednosti – otvorenost, saradnja i širenje znanja – ostale iste. Nadamo se da će časopis i dalje biti relevantan i koristan, dostižući još širu publiku u oblasti zavarivanja.

Dopunjen tekst Mirjane Smiljanić iz Zavarivanja i zavarenih konstrukcija (3/2005), str. 133-137.



Stanislav Mišković

Glavni i odgovorni urednik časopisa od 1955 – 1957. godine

Reprint rada - Zavarivač broj 1, 1955. godina, strana 3 – 9.

Ing. STANISLAV MIŠKOVIĆ, p. pukovnik JNA, Beograd

DK 621.791.763.1 : 660.71

Faktori koji uslovljavaju kvalitetno tačkasto zavarivanje lakih legura

FACTORS OF REGULAR TECHNIQUE OF LIGHT ALLOYS POINT WELDING. Mechanical factors, feature of a construction, peak of an electrode — influence of electric current, time and pressure of electrodes is specially pointed out. Experimental data of light alloys point welding.

FAKTOREN WELCHE EINE QUALITÄTSPUNKTSCHWEISSUNG BEDINGEN. Mechanische Faktoren, Konstruktionsform, Elektroden spitze, Einfluss des elektrischen Stromes, der Zeit und des Elektroden druckes sind besonders beachtet. Beispiele aus der Praxis punktschweißter Leichtmetallkonstruktionen.

Zavarivanje lakih legura aluminijuma i magnezijuma u našoj industriji je do sada malo praktikovano, a rezultati ovoga zavarivanja vrlo retko su u potpunosti odgovarali po svom kvalitetu. Zato sam smatrao za potrebno da na ovom mestu iznesem osnovne faktore koji uslovljavaju kvalitetno tačkasto zavarivanje lakih legura. Smatram da bi bilo potrebno uopšte govoriti o zavarivanju lakih legura što bi moglo biti predmet posebne studije. Zato sam se ovde ograničio samo na jednu vrstu električnog zavarivanja — zavarivanja otporom, pa čak i više na podvrstu ovoga, na tačkasto zavarivanje.

Ovakav kurs u tretiranju postavljenog pitanja uzeo sam još i iz razloga, jer je bilo pokušaja da se lake legure zavaruju gasno i otporom, a pri tom zavarivanju prenosilo se iskustvo sa zavarivanja železnih legura i na zavarivanja lakih legura. Ovakvo prenošenje iskustva na novu vrstu materijala imalo je višestrukih negativnih posledica, te smatram da je potrebno već na samom početku ukazati na one faktore koji utiču na kvalitet tačkastog zavarivanja kod lakih legura, jer se linearnim prenošenjem iskustva od zavarivanja železnih legura na lake legure, obično nisu mogli postići zadovoljavajući rezultati iz sledećih razloga:

- 1) Jer se ne može praviti nikakva analogija između gasnog zavarivanja i zavarivanja otporom.
- 2) Ne može se bez korekcije koristiti analogija između otpornog zavarivanja železnih legura i lakih legura obzirom na hemijske i mehaničke osobine jedne i druge vrste legura.
- 3) Da se do sada nije ozbiljno vodilo računa o ekonomskom momentu kod upoređenja raznih vrsta zavarivanja, a naročito nije još uočena ekonomska vrednost zavarivanja otporom.

Zato sam za predmet ovog izlaganja uzeo baš onu vrstu zavarivanja koju smatram kao najekonomičniju za lake legure.

Ovome treba dodati da je tehnika zavarivanja otporom — tehnika automatskog zavarivanja i da čini jedan krupan korak napred od ručnog zavarivanja, jer se na ovaj način za sada obezbeđuje identičnost uslova rada i kvaliteta zavarene tačke od početka do kraja zavarivanja jednog objekta. Ovo je naročito važno za naše prilike, kada uzmemo u obzir nivo stručne spreme naših zavarivača i značaj individualnog faktora kod zavarivanja. Sve ovo me je navelo da u ovom izlaganju diskutujem osnovne faktore koji uslovljavaju kvalitetno i ekonomično tačkasto zavarivanje lakih legura.

Dobro tačkasto zavarivanje mora da ispunji osnovne uslove da može da bude primenjeno kao tehnika spajanja metalnih delova, a to su:

- a) Da bude otporno na mehanička (statička i dinamička) naprezanja,
- b) Da omogući otpornost konstrukcije i izvođenje ove iz lakih legura kao što su aluminijumske i magnezijumske legure i time omogući uštedu na težini konstrukcije što je naročito važno za železnička i putna vozila i sve vazduhoplovne konstrukcije,
- c) Da omogući ekonomiju u težini izrađenog predmeta čime ova vrsta zavarivanja nalazi svoje mesto u industriji,
- d) Da se pri izvođenju pravilno uoči razlika u tehnici zavarivanja železa i njegovih legura kao i lakih legura s obzirom na razliku koja proističe iz hemijskih i mehaničkih osobina ovih legura ako su one izložene radu na visokim temperaturama, kako pri izradi tako i kod upotrebe,
- e) Da se poštuju, i to vrlo striktno oni faktori od kojih u osnovi zavisi kvalitet tačkastog zavarivanja.

Kao što je napred rečeno, tačkasto zavarivanje je automatsko-mašinsko zavarivanje, te se mora



baciti jedan pogled i na one faktore koji su vezani za mašinu sa kojom će se ovo zavarivanje vršiti. Glavni faktori koji su od najvećeg uticaja na proces tačkastog zavarivanja i o kojima se posebno mora voditi računa kod mašina tačkastog zavarivanja lakih legura jesu sledeći:

- 1) Električna provodljivost,
- 2) Temperatura topljenja,
- 3) Specifična toplota materijala koji se zavaruje,
- 4) Termička provodljivost materijala,
- 5) Stanje površina komada koji se zavaruje,
- 6) Afinitet ili sklonost za stvaranje legura između materijala koji se zavaruje i elektroda mašine sa kojom se zavaruje.

I pored toga što su ovi faktori koje smo napred naveli kod tačkastog zavarivanja železa i njegovih legura različiti od istih faktora za lake legure, oni su različiti i kod lakih legura u zavisnosti od njihovog hemiskog sastava i mehaničkih osobina lakih legura. Napomenuću samo kao primer razliku u ponašanju između aluminiskih i magnezijumovih legura.

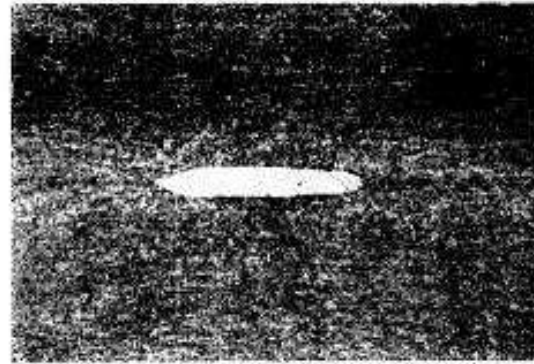
Pomenuti faktori pre svega su međusobno najtešnje povezani sa strujom (vrstom i intenzitetom), no pored struje kod tačkastog zavarivanja da bi se dobila jednostruka ili dvostruka zavarena tačka, treba odrediti jačinu struje, vreme trajanja prolaza struje, veličinu i trajanje pritiska elektroda.

Količina toplote potrebne za topljenje zavarene tačke zavisi od temperature topljenja metala koji se zavaruje i njegove specifične toplote. Ali, ova toplota se ne saopštava samo zavarenoj tački, već se jedan deo pri prolasku struje prenosi i na materijal koji okružava zavarenu tačku. Ova količina toplote upravo je srazmerna električkoj provodljivosti i približno je ista za aluminijum kao i za železo.

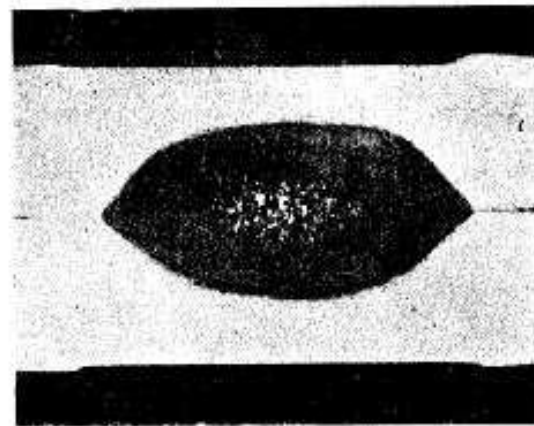
Međutim, stvari stoje sasvim drukčije, što se tiče intenziteta struje potrebne da se dobije napred pomenuta količina toplote u ograničenom vremenu, jer je intenzitet struje obrnuto srazmeran omskom otporu materijala koji je stegnut između elektroda. Kako je toplotna provodljivost aluminijuma 3 do 3,5 puta veća nego kod železa, a vreme zavarivanja je vrlo kratko (o razlozima kratkoće trajanja zavarivanja biće reči u daljem izlaganju), struja zavarivanja za aluminijum biće nekoliko puta veća nego struja za zavarivanje železa, pri istoj debljini delova koji se zavaruju. Vreme trajanja prolaska struje — vreme zavarivanja mora biti što kraće, da bi se izbeglo stvaranje legura između metala elektroda i metala predmeta koji se zavaruje.

Da bi ovo bilo razumljivije, dajemo karakteristične s'učajeve zavarene tačke.

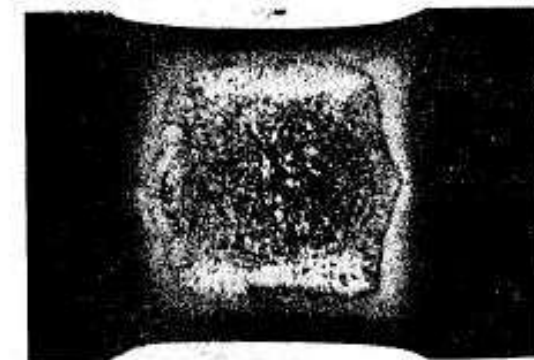
Pored ovoga vreme zavarivanja kod tačkastog zavarivanja mora biti tačno određeno zbog velike termičke provodljivosti aluminijuma i nestabilnosti strukture materijala koji okružava zavarenu tačku.



Sl. 1 Zavarena tačka vrlo mala, a mehanička otpornost nedovoljna



Sl. 2 Pravilno zavarena tačka



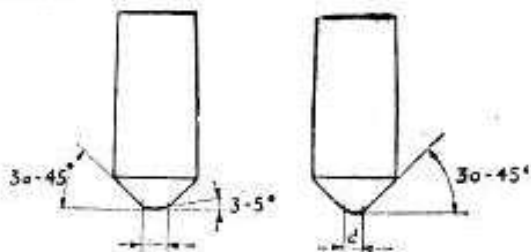
Sl. 3 Velika zavarena tačka koja je svojim formiranjem izmenila strukturu materijala koji je okružava, a i sama je nepravilna i jako porozna.

Mehanički činioci

Od mehaničkih činioca koji utiču na kvalitet zavarene tačke osnovni su: oblik i kakvoća elektroda, a zatim veličina i trajanje pritiska elektroda. Oblak elektrode i materijal od koga je ova izrađena predstavljaju faktor kvaliteta tačkastog zavarivanja. Provodljivost materijala od koga je elektroda izrađena, a zbog gubitaka usled omskih

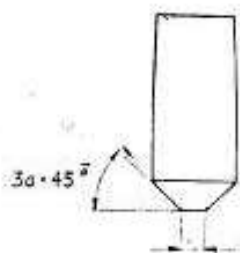


otpora same mašine treba da bude najmanje 75% od provodljivosti čistoga bakra. Pri tom mora imati veliku mehaničku otpornost, homogenost i gustinu. Nesme imati sklonosti građenja legura apsorpcijom sa materijalom koji se zavaruje. Meke elektrode lako se lepe na predmet koji se zavaruje, a vrh elektroda se deformiše pod pritiskom potrebnim za zavarivanje te na taj način s jedne strane ostavlja neprijatne i ružne otiske na zavarenom predmetu, a s druge strane menja uslove gustine i oblika prolaska struje kroz zavarenu tačku, te uslovljava različitost zavarene tačke kako po obliku tako i po kvalitetu.



Sl. 4 Elektroda koničnog oblika

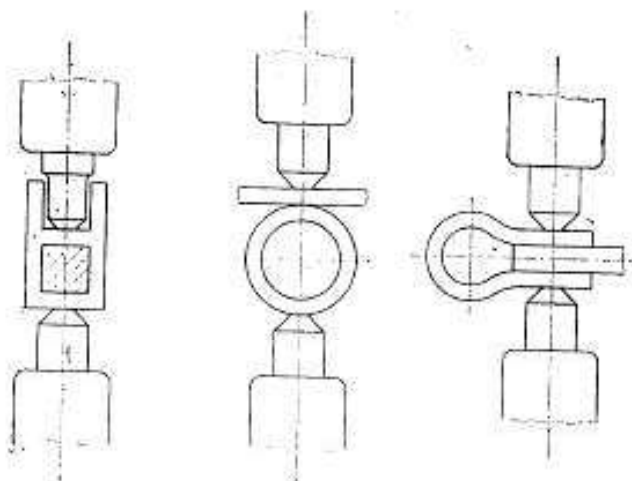
Sl. 5 Sferična forma vrha elektrode



Sl. 6 Ravni oblik vrha elektrode

Stanje površine predmeta koji se zavaruje spada među mehaničke faktore. Poznato je da se na površinama predmeta iz aluminijumskih legura formira sloj oksida aluminijuma Al_2O_3 koji je vrlo rđav provodnik električne struje, pa je zbog toga potrebno, taj sloj oksida prvo razbiti velikom jačinom struje i lokalnim zagrevanjem. No povećavanje otpora između elektroda s druge strane je pak korisno, jer pospešuje zagrevanje zavarene tačke. Kako će se gledati na prisustvo oksida aluminijuma između elektroda zavisi od karakteristika mašina za tačkasto zavarivanje i usvojenoga programa struje.

Sloj aluminijumskog oksida u dodiru sa elektrodama bez sumnje je nekoristan. To znači da površina predmeta koji se zavaruje, a koja dolazi u dodir sa elektrodama, mora biti oslobođena ovog oksida, dok na dodirnim površinama sastavnih delova koji se tačkasto zavaruje, sloj oksida ima suprotno dejstvo i predstavlja korisni faktor, jer omogućuje brže zagrevanje zavarene tačke. Zato u pripremnim radovima za tačkasto zavarivanje treba rešiti pitanje čišćenja površina na jedan od



Sl. 7 Slučajevi kada se tačkasto zavarivanje ne može primeniti

usvojenih načina kako od oksida tako i od drugih nečistoća, koje pri sagorevanju mogu uticati na hemijski sastav zavarene tačke.

Kao što sam ranije rekao sve lake legure imaju sklonost da se legiraju sa materijalom elektroda i to na relativno niskim temperaturama. Na povišenim temperaturama, do temperature topljenja materijala zavarene tačke, ova sklonost je u apsolutnom smislu još više izražena i povezana sa činjenicom uslovljavanja odgovarajuće strukture novoizgrađene legure zavarene tačke. Ova se činjenica ne može apriori oceniti ni kao pozitivno ni kao negativna za kvalitet zavarivanja, već ona zavisi od duhovitog kombinovanja ovih elemenata da bi se ispunili uslovi koje smo napred naveli za kvalitet zavarene tačke.

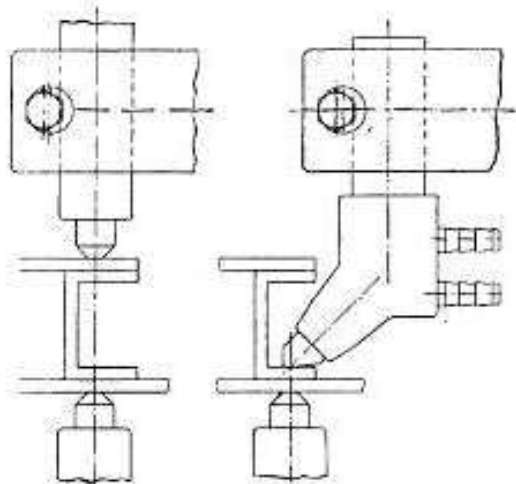
Prisustvo oksida i još zbog mogućnosti redukcije sagorevanjem nečistoća na površinama omogućava da se u zavarenoj tački pojave neželjene uključine. Sve ovo čini da se može doneti zaključak da se sloj oksida aluminijuma okarakterise kao škodljiv i da ga treba ukloniti sa površine delova, koji se zavaruju, a sa one strane gde su ti delovi u kontaktu sa elektrodama mašine.

Oblik predmeta

Oblik predmeta koji se zavaruje igra isto tako važnu ulogu za kvalitet tačkastog zavarivanja. Oblici i dimenzije predmeta koji se zavaruju moraju odgovarati izvesnim uslovima. Od tih uslova najvažniji je: da put električne struje u komadu koji se zavaruje, t. j. kroz zavarenu tačku, bude pravoliniski od jedne na drugu elektrodu. Zbog ovoga se u principu limovi najlakše tačkasto zavaruju, pa i onda kad su oni veće debljine. Najveća ukupna debljina limova koji se tačkasto zavaruju zavisi od karakteristika mašine za tačkasto zavarivanje. Za sada se ova debljina za limove iz lakih legura kreće do 10 mm. Zavarivanje dva profila ili zavarivanje profila i lima, kao što je to slučaj zavarivanja obloga na skeleturu železničkih vagona

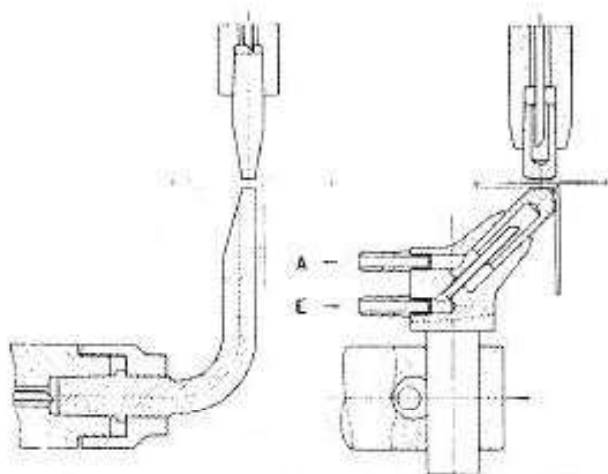


ili karoserija automobila i oplate na avionima, moguće je samo ako se elektrode mogu tako podešiti da struja prolazi direktno, što je moguće više pravolinijski, sa jednog kraka profila na odgovarajući krak drugog profila ili sa kraka profila na lim koji se na ovaj zavaruje.



Sl. 8. a) Nepodesna elektroda onemogućuje tačkasto zavarivanje, b) primer podešene elektrode

Za slučajeve kada se tačkasto zavarivanje može primeniti moraju se birati podesne konstrukcije jedne ili oba dve elektrode, što zavisi od konstruktora dela koji se zavaruje i konstruktora mašine za zavarivanje i njihove tesne saradnje u toku izvođenja radova.



Sl. 9. Primer držača elektrode: a) nepodesan i nepravilan, b) pravilan i preporučljiv.

Vrlo često se u praksi događa da oblik predmeta koji se zavaruje u električnom smislu služi kao šunt i struja zbog prisustva šunta ne prođe sa jedne na drugu elektrodu kroz zavarenu tačku, već ovu obiđe. Razume se da u tom slučaju ne može se ni govoriti o kvalitetu zavarene tačke. Daljna posledica ovoga jeste, da se zbog nepravilnog prolaska struje vrši i neželjeno zagrevanje delova kon-

strukcije, njene strukture i podataka o njenoj otpornosti.

Preko elektroda kod tačkastog zavarivanja mora se ostvariti i određeni pritisak na delove koji se zavaruju, što zavisi od debljine ovih delova. Zato elektrode za tačkasto zavarivanje aluminijumom moraju biti izrađene od specijalno tvrdoga bakra, koji ima veliku mehaničku otpornost, dobro električnu i toplotnu provodljivost. Ovo je jedan težak uslov za bakarne elektrode, pa je u tom pogledu bilo mnogo pokušaja da se dodatkom vrha elektroda od volframa, srebra i t. d. dobije poboljšani vrh elektroda, no ovo se radi samo u izuzetnim slučajevima i za specijalne radove.

Vrh elektrode.

Ako vrh elektrode koji ostvaruje kontakt sa materijalom koji se zavaruje ima malu površinu t. j. ako su elektrode zaoštrene, dovodi do velike koncentracije struje i znatno olakšava fenomen rekristalizacije zavarene tačke. Gustina struje i intenzitet zagrevanja se smanjuju ukoliko je elektroda tvrda, pa daje zabađanja ove u materijal koji se zavaruje. Od ovoga ima dve štete, jedna je, da je spoljna površina zavarenoga predmeta nepoželjno neravna, a druga je što utiče na kvalitet same zavarene tačke. Što se tiče rekristalizacije opiti su pokazali da je kristalinska struktura zavarene tačke poboljšana smanjenjem temperature u određenom momentu i povećanjem pritiska elektroda. Oštrije elektrode svakako imaju veću tendenciju da zađu u metal, nego elektrode sa zaravnjenim vrhom kao na slici 6.

Ovakve elektrode je mnogo lakše i jeftinije održavati u ispravnom stanju, da ne bi došlo do stalnog povećanja površine dodira i nejednobraznosti zavarenih tačaka na predmetima izrađenim iz istog materijala.

Uticaj struje, vremena zavarivanja i pritiska elektroda

Struja, trajanje i veličina pritiska sa kojim elektroda pritiskuje lim koji se zavaruje su tri faktora koji igraju najveću ulogu kod trakastog zavarivanja.

Iako ovi svi faktori zavise jedan od drugoga, ipak nisu od jednake važnosti. Ovde moramo istaći da je pitanje reglaže struje na pravu vrednost najvažnija stvar.

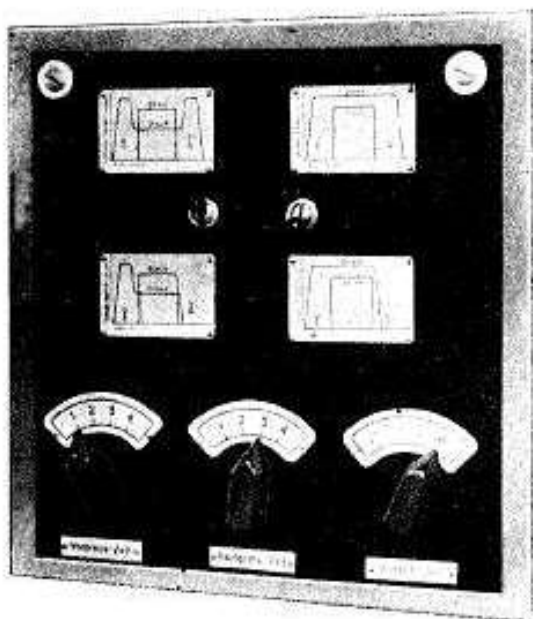
Vrednost intenziteta struje zavisi od vrste materijala koji se zavaruje i debljine komada u spoju. Pritisak zavisi od debljine delova i stanja dodirnih površina, ali ako se i ne postigne potrebni pritisak rezultat neće biti tako nepovoljan, kao što bi to bio slučaj sa nedovoljnim intenzitetom struje. O značaju pritiska Dr. V. Zeeleder i Dr. Irmann kažu:

Kod tačkastog zavarivanja mora se izraditi za svaku vrstu tačkastog zavarivanja program pritiska i program struje.

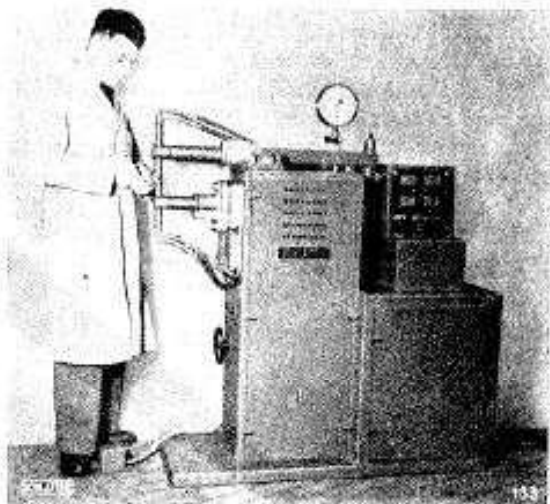


Program pritiska se sastoji u tome da se odredi unapred pritisak za sklop koji će se tačkasto zavariti; pre prolaska struje i neposredno posle prekida struje, koji je veći od prethodnog utvrđenog programa.

Da bi se moglo da utiče blagovremeno na sve faktore od kojih zavisi kvalitet tačkastog zavarivanja, moderne mašine za tačkasto zavarivanje su snabdevene elektronskim uređajima za reglažu struje i pritiska.



Sl. 10 Tabla za reglažu mašine po programu



Sl. 11

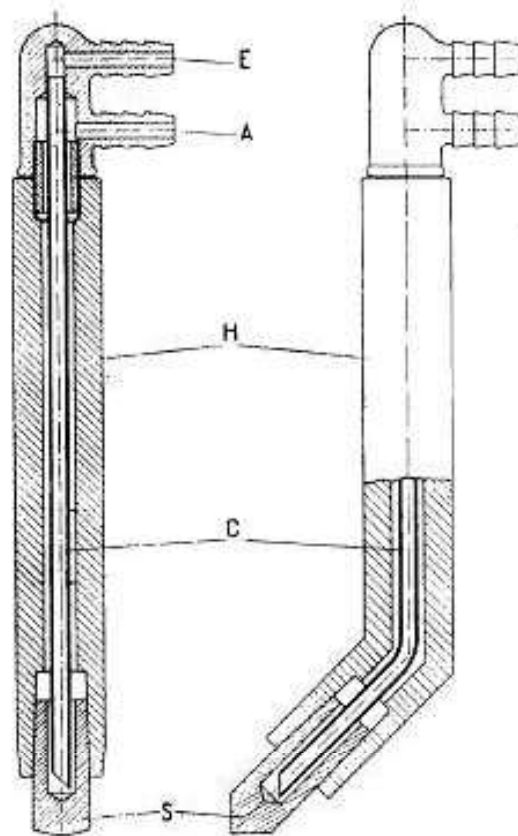
Pitanje izbora maksimalnog napona na sekundaru
Ovaj izbor je otežan činjenicom da je impedancija sekundara vrlo visoka kada se radi o velikoj dužini krakova mašina za tačkasto zavarivanje, kao i činjenice da napon na krajevima mašine može biti

često ispod svoje nominalne vrednosti zbog pada napona u mreži u momentu zavarivanja.

Transformatori dakle treba da su konstruisani za napon u sekundaru mnogo veći, nego što je to slučaj kod običnih mašina za tačkasto zavarivanje čelika. Struja sekundara pri zavarivanju lakih legura dostiže vrednost i do 40.000 A. Zbog ovoga na modernim mašinama za tačkasto zavarivanje lakih legura napon na sekundaru, a u vezi sa tim i struja, mogu se regulisati na 36 vrednosti.

Prethodni pritisak ili pritisak nameštanja naročito za debele komade, služi da popravi kontakt, a naknadni, posle prestanka struje pritisak iskivanja, da sabije istopljeni materijal zavarene tačke.

Program struje služi da poboljša strukturu zavarene tačke i izražen je u promeni jačine struje u jednom kratkom intervalu vremena zavarivanja. Ona je znatno veća u onom delu gde ona vrši samo zavarivanje, a nešto manja u drugom delu gde služi za odgrevanje zavarene tačke i promenu kristalne strukture.



Sl. 12

Kako to izgleda u primeni vidi se na sl. 10 i 11, gde je na prvoj pokazana mašina za tačkasto zavarivanje sa regulacijom programa. Ova mašina radi sa jačinom struje do 16.000 A.

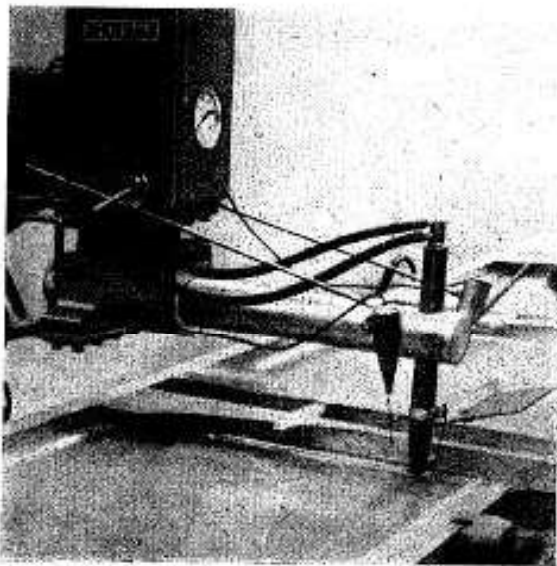
Veće ili manje trajanje pritiska za iskivanje drugog dela programa deluje preko elek-



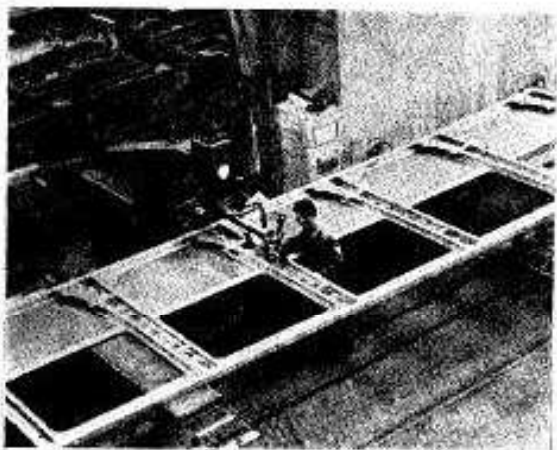
troda i na hlađenje zavarene tačke, manje ili više intenzivno, što zavisi od oblika vrha elektrode i materijala od koga je ona izrađena.

U našim slučajevima, kada se želi da se poveća proizvodnost mašine za tačkasto zavarivanje, treba izvršiti regulisanje cirkulacije vazduha kroz šuplje elektrode (sl. 12).

Trajanje zavarivanja za razne slučajeve kreće se od 3/100 sekunda do 3 sekunde, što se postiže regulacijom mašine prema napred utvrđenom programu.



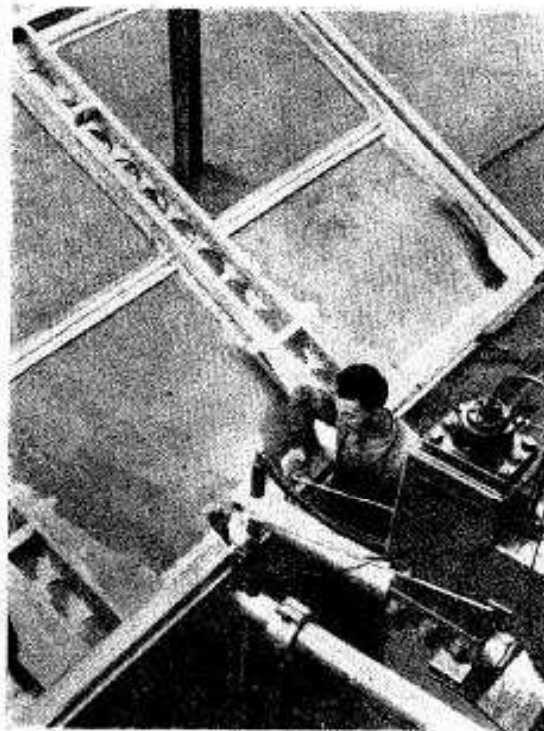
Sl. 13 Mašina za tačkasto zavarivanje velike staze namijenjena tačkastom zavarivanju željezničkih kola iz lakih legura.



Sl. 14 prikazuje jednu bočnu stranu vagona za vreme tačkastog zavarivanja limova oplata od 2,5 mm debljine na skeleturu. Skeletura i limovi su iz durala. Da bi se moglo tačkasto zavariti jednu stranu duga 8,5 m i široka 2,3 m trebalo je da se ostvari saradnja između konstruktora mašina za tačkasto zavarivanje, kao i konstruktora predmeta koje će se zavarivati.

Nekoliko primera tačkastog zavarivanja

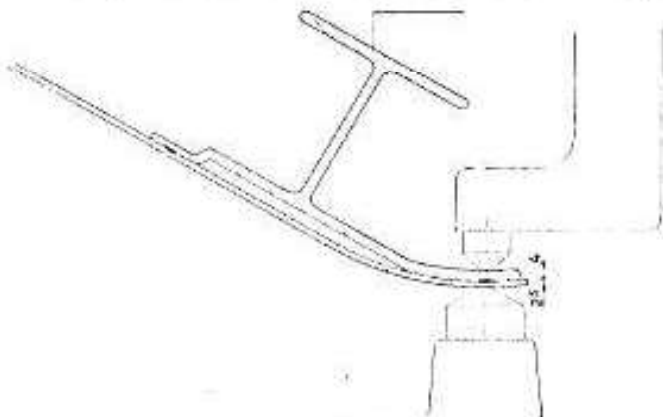
Da bi se dobila prestava gde se i kako može primeniti tačkasto zavarivanje daću nekoliko primera iz proizvodnje francuske industrije željezničkih vozila.



Sl. 15 pokazuje detalj tačkastog zavarivanja na krivim površinama.

Zadatak je bio, kao što se vidi, zajednički: konstruktivnog biroa i rukovodstva radionica, pa i organa eksploatacije željeznica da ostvare na ekonomičan način i u kolektivnom radu ovaj posao.

Ovaj uređaj se sastoji uglavnom od dva pokretna nosača — držača predmeta, pomoću kojih se predmet pomera u dva pravca jedan na drugi okomit, te se na taj način svaka tačka na predmetu može da dostigne vrhovima mašine za tačkasto zavarivanje.



Sl. 16

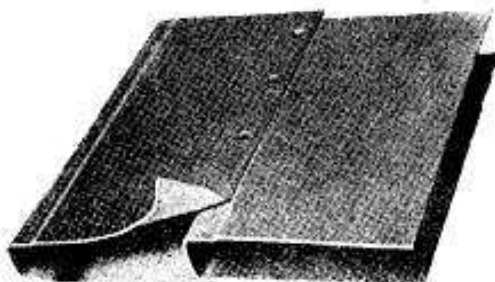


Treba napomenuti da su krakovi elektroda na mašini podešeni da se mogu produžavati i skraćivati u toku rada primenom pneumatičnog sistema.

Ovaj slučaj zahteva osobitu pažnju kod određivanja i fabrikacije elektroda i pri samome zavarivanju. Da bi elektrode pravilno nalegale na komad koji se zavaruje, što je jedan od najvažnijih uslova za dobro zavarivanje, treba kao što je na slici pokazano, predmet zavarivanja postaviti u nagnuti položaj.

Uređaj pokazan kao nosač predmeta može se lako podesiti da se predmetu zavarivanja da željeni nagnuti položaj.

Slika 16 pokazuje položaj koji treba da ima bočna stranica, kao i kakav treba da bude oblik držača elektroda, pa da se može da izvrši dobro tačkasto zavarivanje oplata na skeleturu vagona.



Sl. 17

Slika 17 pokazuje duhovit način izrade poda u putničkim kolima. Kao što se vidi pod je sastavljen iz komada U oblika. Oblik profila i njihova veza omogućuju izradu patosa iz jednog dela velike dužine i širine.

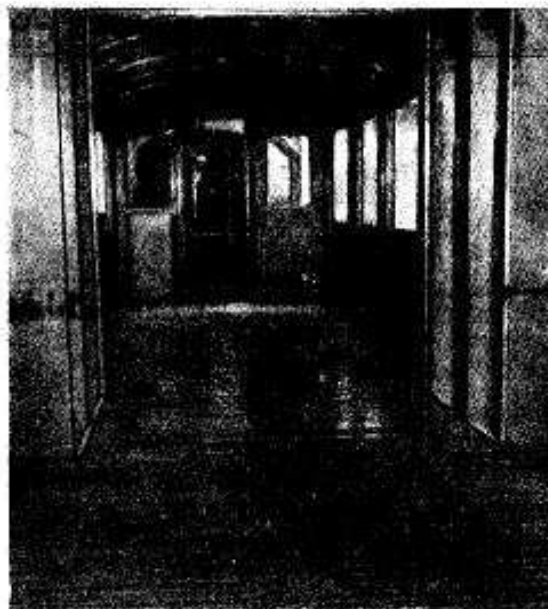
Radi montaže potrebno je da se izrade delovi poda od 2,4 m dužine i 2,4 m širine koji će se na licu mesta pričvrstiti zakovicama ili zavrtnjima.

Slika 18 pokazuje jedan vagon Brünig sa šupljim podom. Razni sastavni delovi su izrađeni u dve operacije: savijanje lima iz antikorodala debljine 1,5 mm i zavarivanje »U« profila i celinu patosa. Sastavni delovi su tačkastim zavarivanjem međusobno spojeni. Na slici se vidi završni pod pripremljen za postavljanje gumenog tepiha. Isto tako vidi se i armatura koja je izrađena tačkastim zavarivanjem.

Ovim kratkim prikazom želio sam da ukažem na osobenosti zavarivanja otporom posebno na tačkasto zavarivanje, koje je u našoj industriji primenjivano već od 1936 godine, ali je usled malog isku-

stva i nepoznavanja iznetih osnovnih faktora, već na samom početku, kod naših ljudi u produkciji, oslabilo poverenje.

S druge strane želim, da i kod naših konstruktora železničkih i putnih vozila i vazd, konstrukcija pobudim interes za ovu ekonomičnu i elegantnu tehniku spajanja metalnih delova iz lakih legura.



Sl. 18

Nadam se, da će i proizvođači uređaja i pribora za električno zavarivanje naći svog interesa za proizvodnju mašina za tačkasto zavarivanje, a obzirom da naša industrija može da omogući izradu železničkih i putnih vozila iz lakih legura i vazduhoplovnih konstrukcija i time postignemo ekonomiju u čeliku koja je u našoj zemlji nesumnjivo potrebna.

LITERATURA:

Referati sa konferencije Švajcarskog Društva za ispitivanje materijala (VSMT 1)

- 1) Predavanje H. A. Shlatte-a ing. Zolikon (Zürich), na temu: Tačkasto zavarivanje lakih legura u konstrukcijama železničkih vozila i izbor mašina za zavarivanje.
- 2) Predavanje Dr. Bernard, SIG Neuhansen-a na temu: Upotreba tačkastog zavarivanja u konstrukcijama železničkih vozila iz lakih legura.
- 3) Predavanje H. A. Shlatte-a ing. Zolikon (Zürich) na temu: Glavni faktori koji uslovljavaju tačkasto zavarivanje lakih legura.
- 4) Brošura firme Selaki, Električno zavarivanje otporom u konstrukcijama voznog parka na železnicama.



Milan Radojković

Glavni i odgovorni urednik časopisa od 1958 – 1978. godine

Reprint rada - Zavarivač broj 1, 1967. godina, str. 3 - 17.

Milan Radojković*

UTICAJ GREŠAKA NA JAČINU ZAMORA SUČEONOG ZAVARENOG SPOJA

Različiti značaj greške koja postoji u zavarenom šavu. Osnovna ideja izlaganja: Značaj greške treba tretirati iz dva potpuno različita aspekta: 1) ugovor između investitora i izvođača sa koliko pažnje se koji šav mora izraditi; i 2) Značaj greške u šavu sa gledišta opasnosti po opstanak konstrukcije ili štetu koja bi nastala usled eventualnog rušenja konstrukcije. Ovo implicira potrebu klasifikacije konstrukcija sa gledišta loma ili ispadanja konstrukcije iz rada, mereno opasnošću po ljudske živote ili ekonomskom štetom.

Pregled dosadašnjih rezultata ispitivanja uticaja grešaka na jačinu zamora zavarenih spojeva. Realizacija međunarodnog programa za ispitivanje uticaja grešaka na jačinu zamora ovih spojeva.

1. Opšte

Uvođenje zavarivanja, kao sredstva spajanja u metalnim konstrukcijama svih vrsta, omogućilo je inženjerima da ostvare konstrukcije koje su još pre nekoliko decenija izgledale nemoguće. Međutim, zavodljiva moć koju zavarivanje pruža metalnoj konstrukciji vodi i kroz određene scile i haribde odiseje naših napredaka. Naime, zavedeni mogućnostima konstruktivnih rešenja i zavarivanjem kao sredstvom spajanja, mi se ponekad nesvesno približavamo graničnim vrednostima upotrebljenih obrazaca za dimenzionisanje, bilo u oblasti statičke nosivosti konstrukcije, stabiliteta, zamora materijala ili pak njegove moći nošenja sa gledišta fizike metala.

To je naime tako, jer smo u stvari još uvek daleko od »savršene« konstrukcije u kojoj su zadovoljeni svi uslovi otpornosti materijala, u kojoj je materijal tako raspoređen da je ravnomerno napregnut, da je tok sila ravnomeran, bez koncentratora naprezanja, sa homogenim i izotropnim materijalom bez »metalurških zareza« ili čak metalurških grešaka kao posledice izrade zavarene konstrukcije i toplotnih ciklusa kojima je materijal izložen.

U konstrukciji nisu zadovoljeni idealizovani uslovi proračuna, koncentratori napona su stalno prisutni i predstvaljaju prvog velikog neprijatelja dobrog ponašanja konstrukcije. Usled promene homogenosti materijala zbog toplotnih uticaja zavarivanja, dolazi do metalurških efekata koje figurativno zovemo metalurškim zarezima. Uslovi zavarivanja osim toga neminovno uvode sopstvene napone, koji su po prirodi svojoj višeosni i u svojim vrhovima, jednaki ili bliski granici velikih izduženja. To znači, da u konstrukciji imamo višeosna naponska stanja i da naš komotan, prost i lak način proračuna sa srednjim i najčešće linearnim naponskim stanjima u elastičnoj oblasti — nije stvaran. Usled superponiranja ovih napona, odmah, svako naše računsko elastično naponsko stanje se prevodi u elasto-plastično, plastično ili čak u stanje ojačanja. A ideju kako se menjaju osobine metala pri ovim stanjima možemo dobiti iz Šnatovog osnovnog dijagrama metala, koji pokazuje da jedan isti metal može pri različitim naponskim stanjima imati jednom, žilav lom sa velikom kontrakcijom, a drugi put, kruti lom bez kontrakcije (bez izražene zone plastificiranja).

Ako ovome dodamo različito ponašanje materijala pri statičkom i dinamičkom napreznju, zbog toga što u prvom slučaju imamo tečenje, koje seče i izravna naponske vrhove, a

* prof. ing. M. R. Gradjevinski fakultet Beograd, Bul. Revolucije 73.

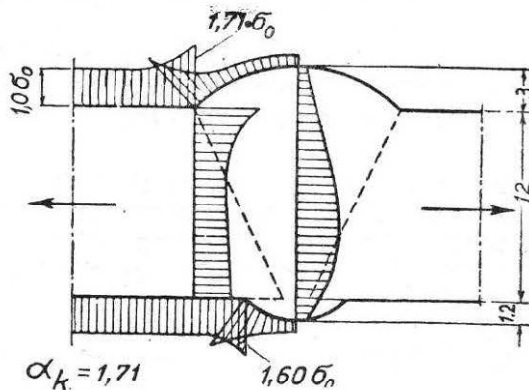


u drugom naponski vrhovi izazivaju zamor i lom konstrukcije.

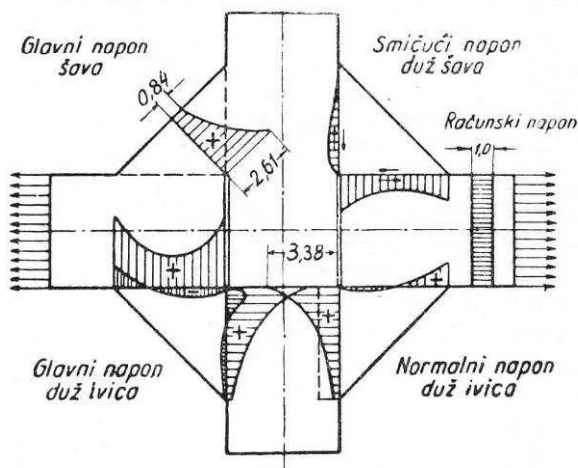
Ovo sve odgovara pod pretpostavkom da je konstruktor odnosno izvodjač dovoljno verziran u probleme metalurgije zavarivanja, tako da su uticaji zavarivanja neznatni ili da su otklonjeni ako bi pretstavljali neki nepovoljan uticaj.

Pri takvom poznavanju stanja stvari pristupimo analizi značaja greške u zavarenom spoju, i to pod stvarnim uslovima tj. ako se od idealne konstrukcije vratimo na stvarnu konstrukciju.

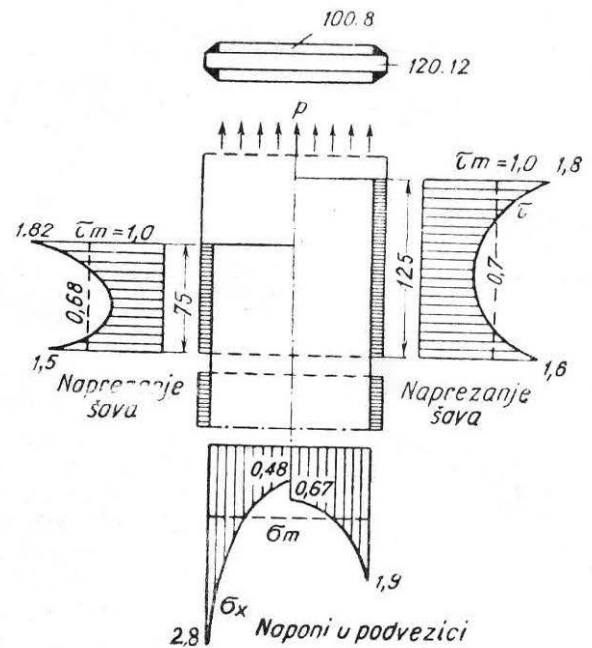
Zavareni spojevi nose sobom neizbežnost koncentracije napona usled devijacije toka linija sila. Pod koncentracijom napona podrazumevamo odnos najvećeg napona prema srednjem (računskom) naponu (slike 1, 2 i 3).



Slika 1 — Raspored napona u napregnutom šavu sučeonog spoja; koeficijent koncentracije 1.71.

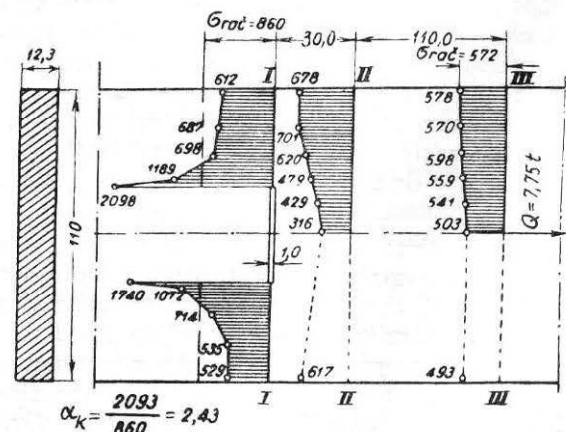


Slika 2 — Raspored napona na modelu krstastog spoja sa čeonim ugaonim spojevima; koeficijenti koncentracije 2.61 i 3.38.



Slika 3 — Raspored napona u elastičnom području preklapnog spoja sa bočnim ugaonim šavovima. Koeficijenti koncentracije između 1.80 i 2.80.

Unutrašnji diskontinuiteti izazvani na primer, nehomogenošću zavarenog spoja (uključine, prsline) ili spoljni diskontinuiteti izazvani na primer, neprovarivanjem korena šava ili, naglim nadvišenjem lica ili naličja šava, predstavljaju nova mesta devijacije toka linija sila — pa samim tim i jake koncentracije napona (slike 4 i 5).



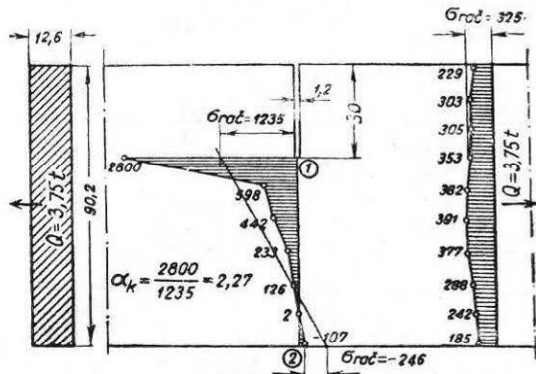
Slika 4 — Raspored napona u zategnutom štapu sa unutrašnjim zarezom; koeficijent koncentracije 2.43.

Pri statičkom napreznju naponski vrhovi se plastificiraju pri dostizanju granice velikih izduženja, pa ima vremena da ceo spoj teče (slika 6).

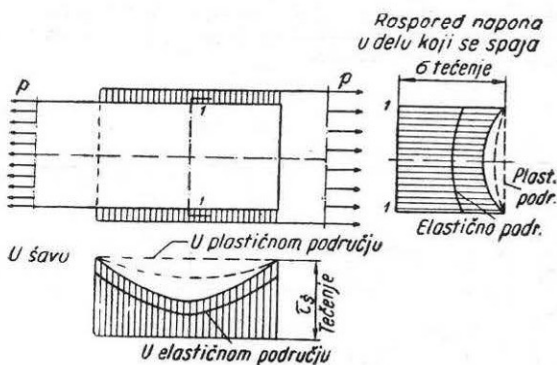


U slučaju dinamičnog napreznja to nije slučaj i zato imamo velike razlike u jačini zamora pojedinih spojeva (primer za čisto jednosmerno napreznje slika 7).

Ovo stanje pogoršavaju sopstveni naponi koje nosi zavarena konstrukcija (slika 8). Sopstveni naponi se međjutim mogu iskoristiti i kao antidejstvo, da svojom veličinom suprot-



Slika 5 — Raspored napona u zategnutom štapu sa dubokim zarezom, koeficijent koncentracije 2.27.



Slika 6 — Raspored napona u preklopnom spoju u elastičnom i plastičnom stanju.

nog znaka ponište naponski vrh, na primer, neke konstruktivne koncentracije napona (slike 9 i 10).

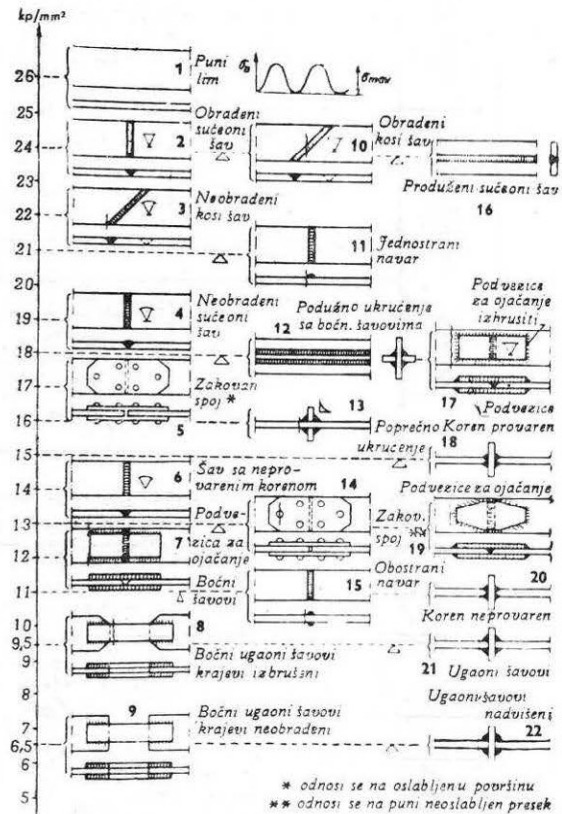
Zato je osnovni zadatak konstruktora i izvršioca konstrukcije u radionici, da svede pojavu zarez na najmanju meru.

Jačina zamora jedne konstrukcije zavisi i od oblikovanja. Ako uslovno prihvatimo oznake karakterističnih linija zamora 1, 2, 3, 4 i 5 kao u slici 11, onda različite konstruktivne oblike možemo da svrstamo prema zamoru, kako je to naznačeno u slikama 12 i 13 za štapove, 14 i 15 za nosače, 16 za prelaz štapova

u čvrne limove i 17 za ukrućenje vertikalnih limova nosača, brodskih oplata i slično.

2. Greške i njihov značaj za sigurnost konstrukcija.

Ako ovo što je dosad rečeno smatramo kao poznatu osnovu za dalje razmatranje, treba objasniti i osnovnu misao ovog izlaganja, a to

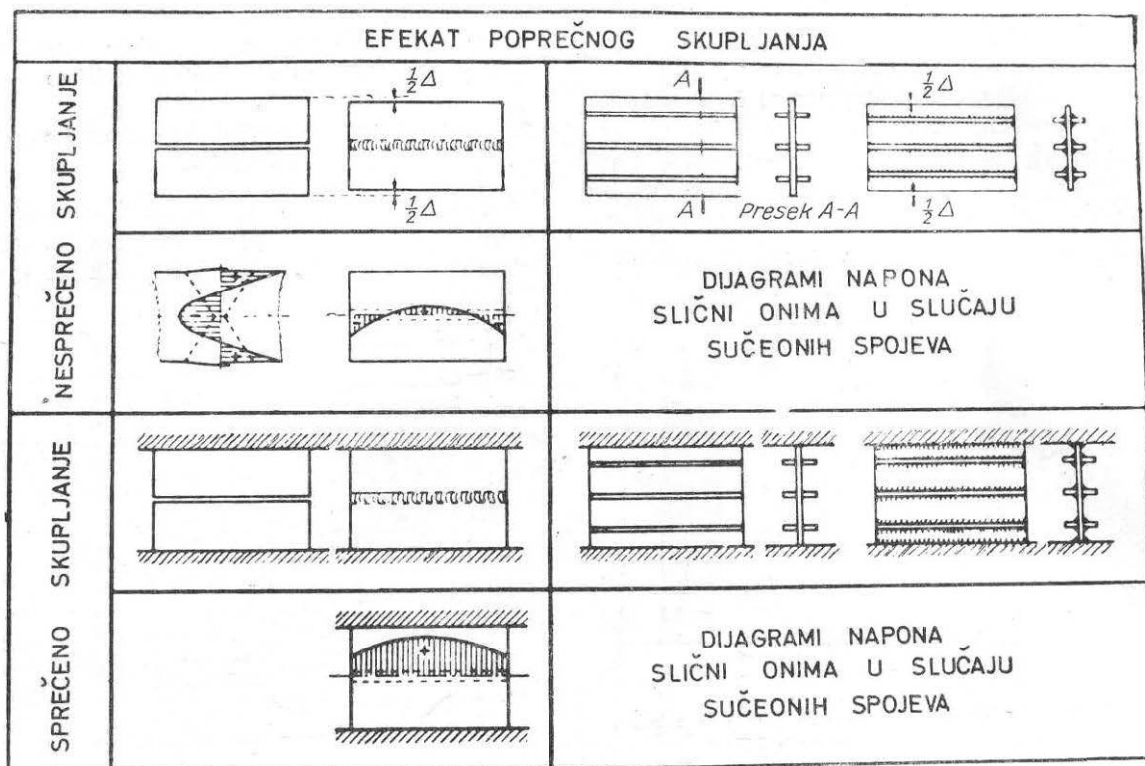


Slika 7 — Podaci za jačinu zamora različitih zavarenih i zakočanih spojeva usled čitog jednosmernog napreznja — kao rezultat nepravilnosti toka linija sila i različitih koncentracija napona.

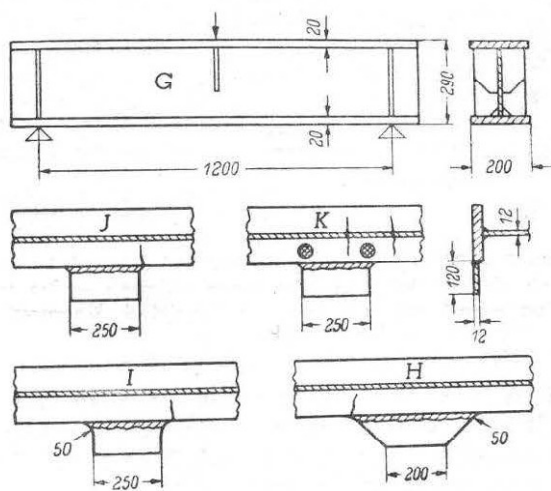
je da jedna ista greška nema isti rđjav uticaj u konstrukciji, već uticaj zavisi od toga, kako je postavljena u odnosu na tok linija sila. Slika 18 daje objašnjenje za to.

Prema tome, izgleda da treba revidirati naše stavove prema značaju greške u šavu i značaju referencnih zbirki radiografija kojima se ocenjuje kvalitet i upotrebljivost šavova.

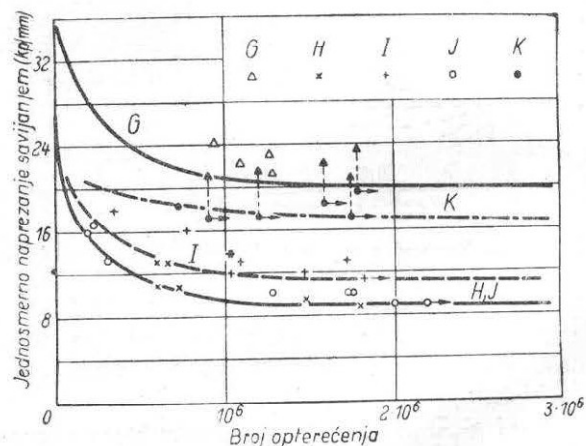
Mislimo, da treba razlikovati dva posve odvojena slučaja: 1^o — ugovor između investitora i izvodjača sa koliko će se pažnje koji šav izraditi; i 2^o — procena mogućnosti da šav sa



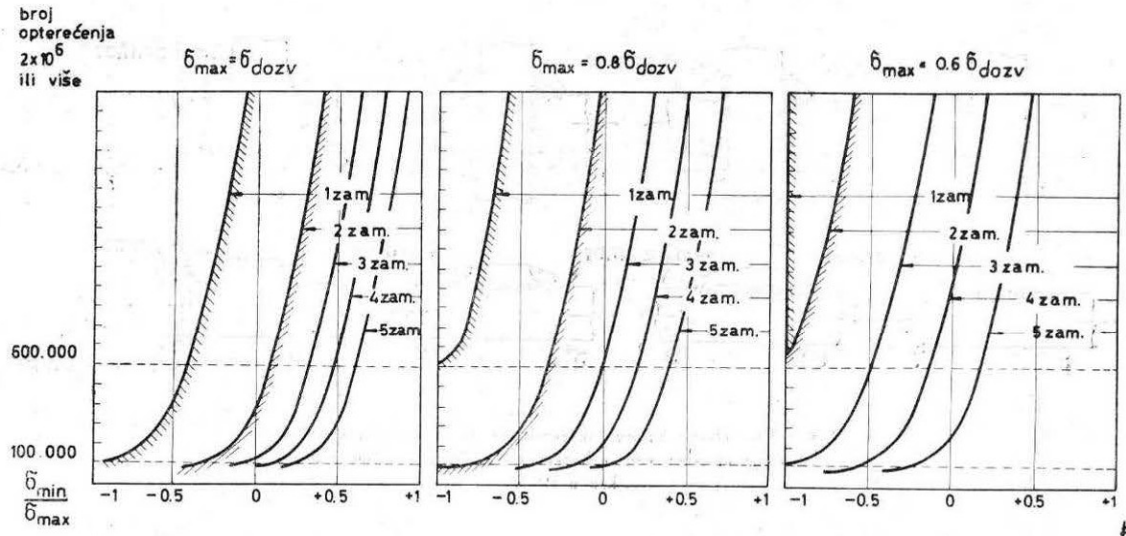
Slika 8 — Prikaz sopstvenih napona u slučaju zavarivanja slo-bodnih i uklještenih delova. U slučaju sprečenih deformacija javljaju se na površini duž celog šava dvoosna naponska stanjazatezanja. Treba uočiti i raspored ostalih napona (poprečnih na pravcu šava) po debljini dela koji se spaja: blizu površine su zatezanje σ u sredini pritisak.



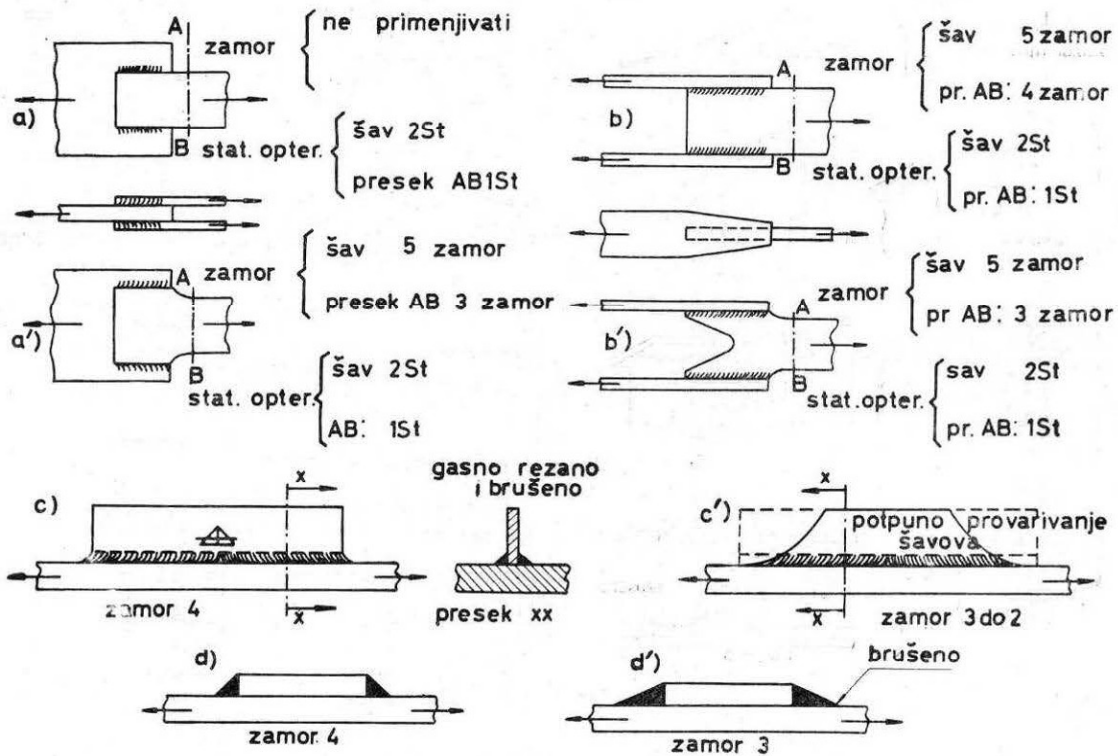
Slika 9 — Oblik i dimenzije probnog nosača za probu zamorom sa različitim oblicima zavarenih čvornih limova u donjem, zategnutom pojasu. Slučaj G je nosač bez čvornih limova. Slučajevi J, I i K su različito oblikovani čvorni limovi u cilju smanjenja uticaja koncentracije napona na početku čvornog lima. Slučaj K je identičan sa J, ali sa nanošenjem dve toplotne tačke kojima su na tim mestima uvedeni sopstveni naponi. Raspored ovih napona je takav da su na ivicama pritiskujući naponi. Na slici su prikazana mesta lomova usled zamora.



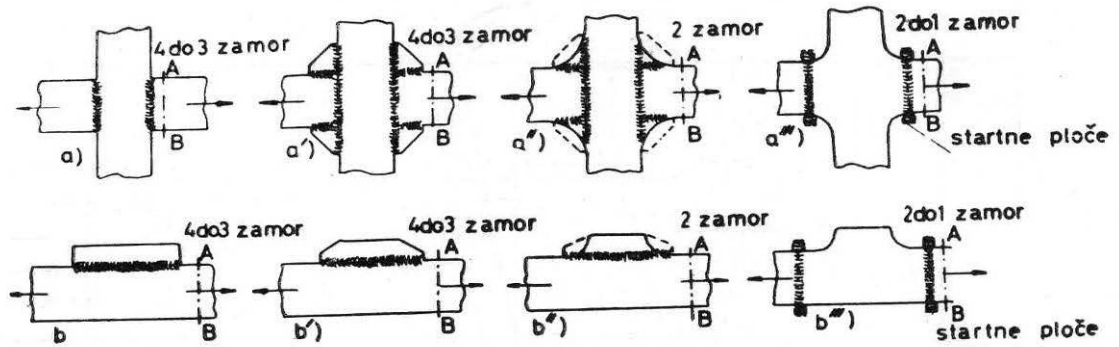
Slika 10 — Rezultati ispitivanja jačine zamora (za čisto jednosmerno naprezanje) nosača prema slici 9. Nosač sa čvornim limovima tipa H i J ima jačinu zamora 9 kp/mm^2 ; tipa I 11 kp/mm^2 ; sa toplotnim tačkama (tip K) 17 kp/mm^2 a nosač bez čvornih limova 20 kp/mm^2 . Iz slike 9 proizilazi da je lom nosača tipa K nastao usled grešaka u ugaonim šavovima za vezu rebra i pojasa, a ne usled koncentracije napona usled čvornog lima. Ovu koncentraciju... su poništili sopstveni naponi suprotnog smeru.



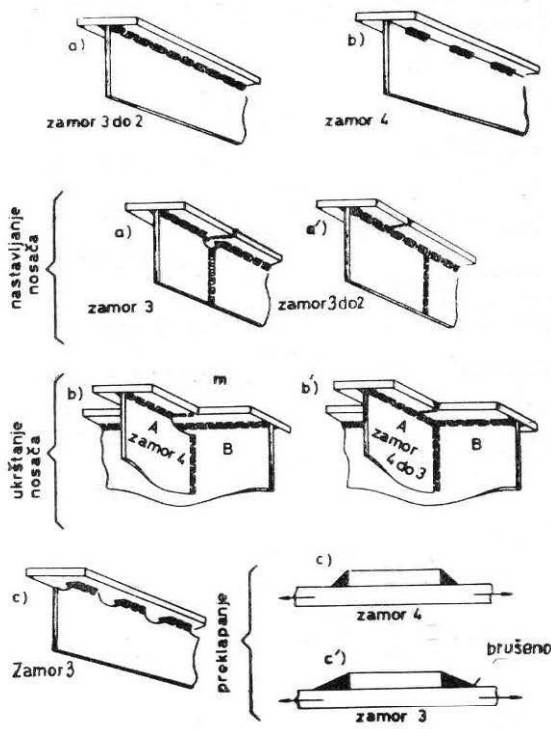
Slika 11 — Pregled i objašnjenje oznaka 1Zam, 2Zam, 3Zam, 4Zam, 5Zam. Prikazano je prostiranje polja uticaja odnosa $\min\sigma/\max\sigma$ i broja opterećenja N za različite nivoe zamora zavarenih spojeva sa 1 Zam, 2 Zam, 3 Zam, 4 Zam, 5 Zam. Svaki se od tri dijagrama odnosi na različitu vrednost σ_{\max} i to prvi za $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{dozv}}$ tj. dozvoljeni napon u osnovnom materijalu za statičko opterećenje; drugi za $\sigma_{\max} = 0.8 \sigma_{\text{dozv}}$; treći za $\sigma_{\max} = 0.6 \sigma_{\text{dozv}}$. Krive koje ograničavaju pojedina polja su srednje i približne krive uzete iz odredaba za dozvoljene napone nekih postojećih propisa, te se ne mogu upotrebljavati kao podaci za proračun spoja u nekom određenom slučaju — već samo za kvalitativnu analizu.



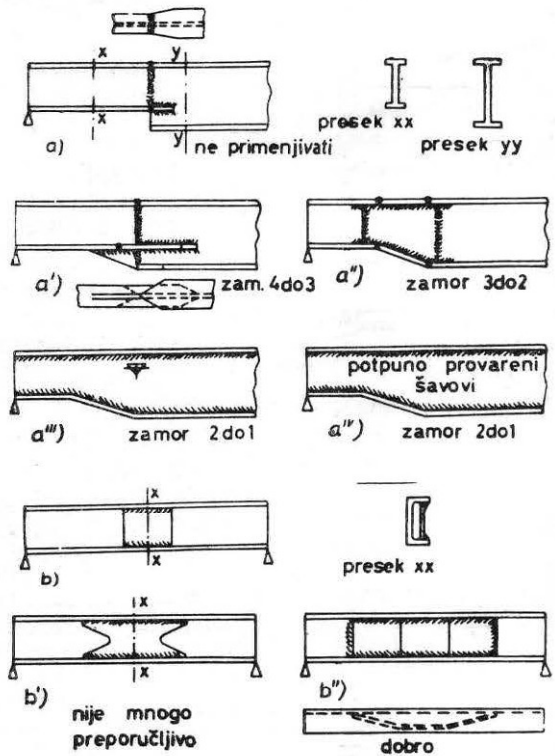
Slika 12 — Uticaj krajeva bočnih ugaonih šavova na nosivost zavarene veze. Pokazan je uticaj na jačinu zavarivanja i statičku nosivost. Jačina zamora obeležena je brojevima 1 do 5 prema slici 11. Statička nosivost je obeležena brojevima 4 St (dobro) i 2 St (slabo).



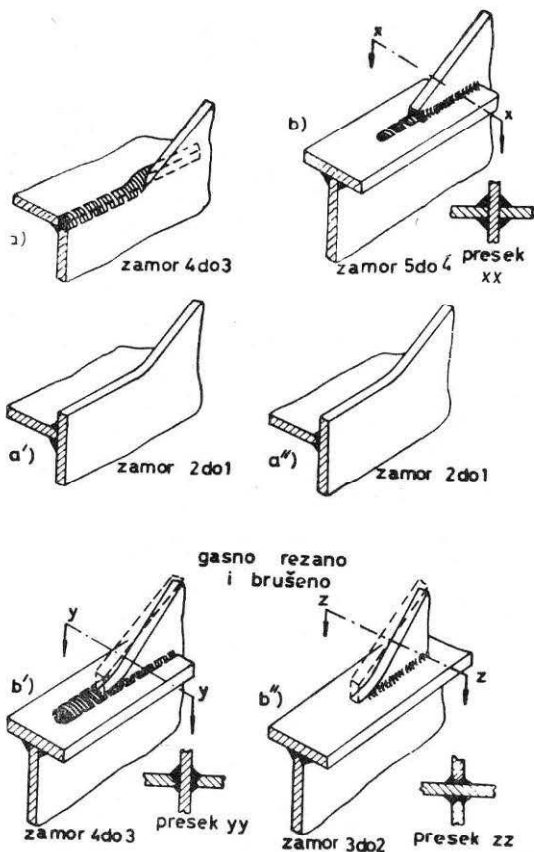
Slika 13 — Uticaj krajeva sučeonih šavova na mestima promene preseka, na nosivost veze i konstrukcije. Oznake jačine zamora kao u sl. 12.



Slika 14 — Spoj vertikalnog lima i lamele i neki drugi konstruktivni slučajevi; nastavak nosača i ukrštanje nosača. Date su oznake jačine zamora ovih zavarenih spojeva na isti način kao u sl. 12 i 13.

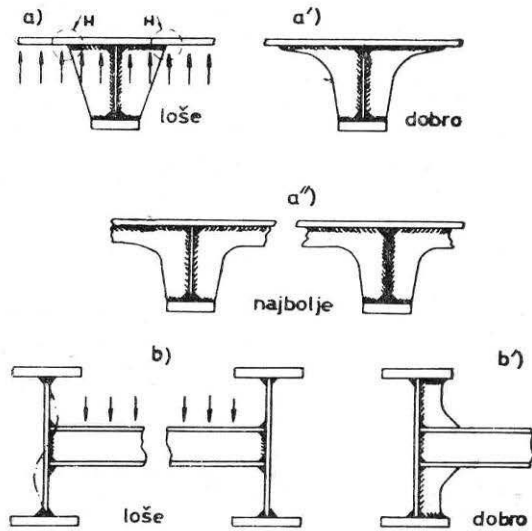


Slika 15. Uticaj oblikovanja nosača: a) promena poprečnog preseka nosača (promena visine); b) promena krutosti prema torziji. Oznake jačine zamora ovakvih zavarenih rešenja date su kao u sl. 12.

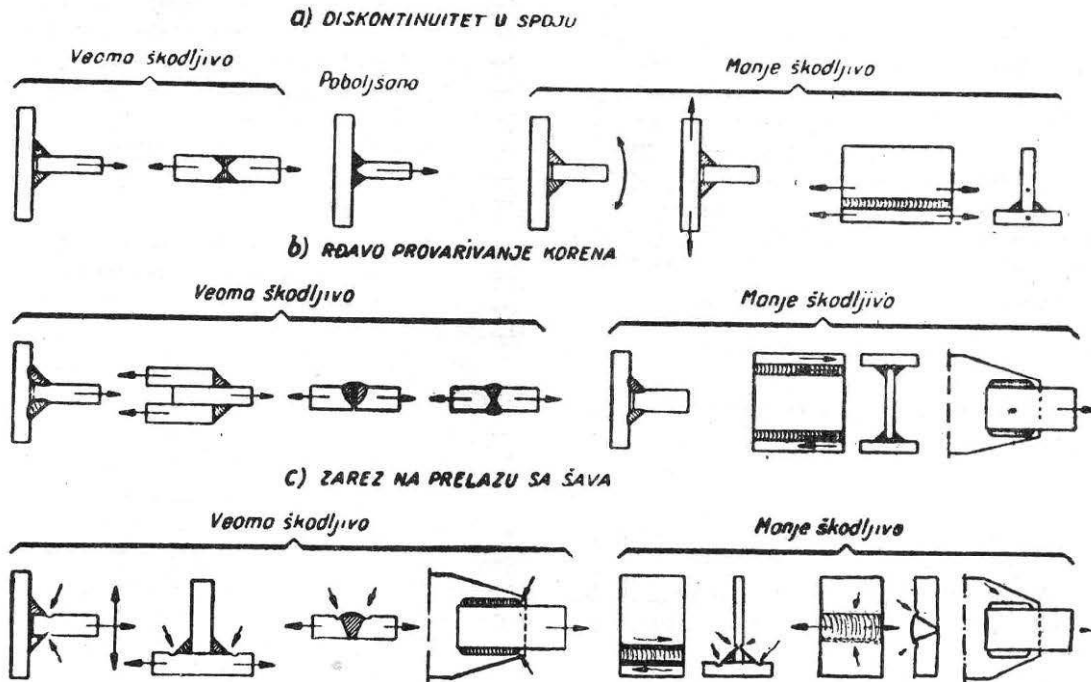


Slika 16 — Oblikovanje prilikom promene visine jednog elementa: a) slučaj sandučastog preseka štapa rešetke pri ulazu u čvor; b) slučaj produženja vertikalnog lima nosača. Oznake jačine zamora pojedinih zavarenih rešenja ista kao u sl. 12.

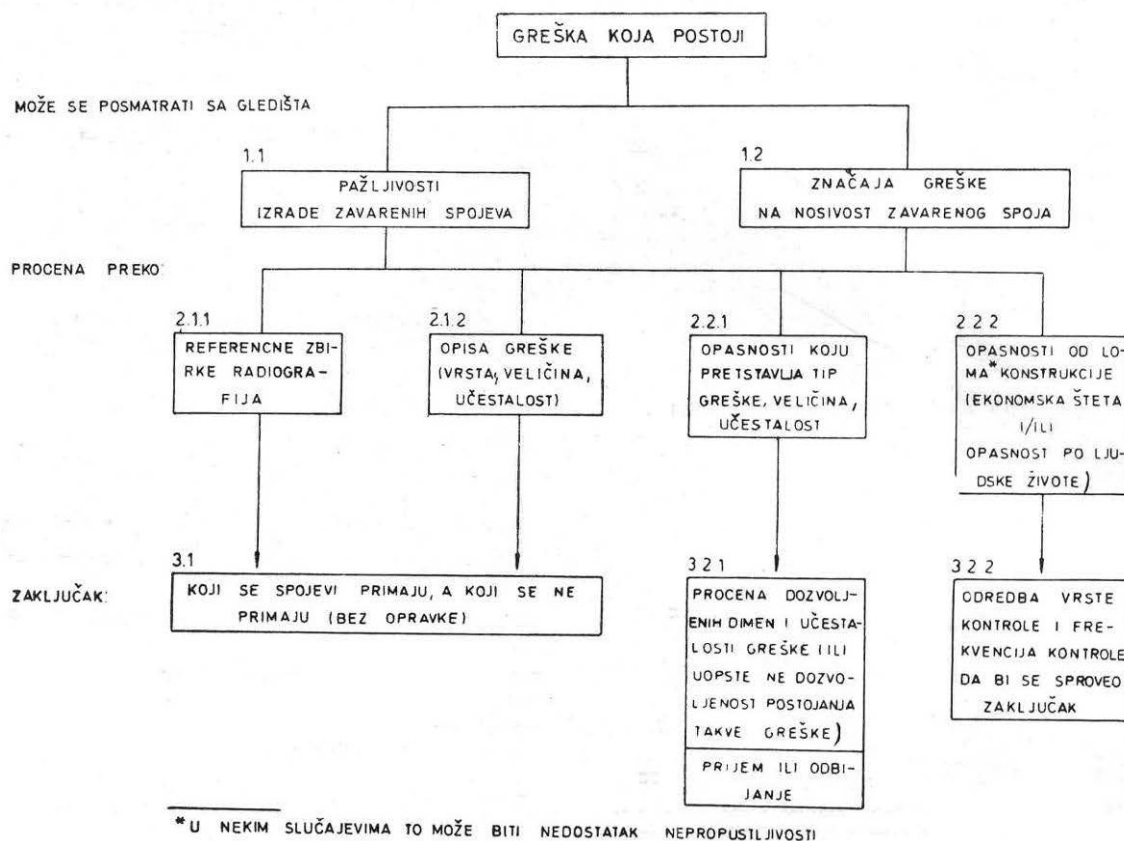
određenim greškama bude primljen s obzirom na potrebnu sigurnost spoja, ili obratno, s obzirom na štetnost konstatovane greške u datom konstruktivnom elementu.



Slika 17 — Nekoliko karakterističnih oblikovanja u zavarenim konstrukcijama, nazvanih »tvrde tačke»: a) javlja se u mostogradnji, gradnji kranova i sl. Oznake jačine zamora pojedinih zavarenih rešenja ista kao u sl. 12.



Slika 18 — Škodljivost zarez koji se javljaju u zavarenim spojevima pri različitim odnosima položaja zarez i toka linija sila.



U prvom slučaju radi se dakle samo o utvrđivanju pažnje s kojom je konstrukcija izrađena. To se najefikasnije može učiniti putem radiografskog snimka. U tom slučaju zbirke radiografija, na primer, Međunarodnog instituta za zavarivanje, imaju ulogu etalona za odluku da li se kvalitet jednog šava prima ili ne. U ovom slučaju vrši se samo uporedjenje dobijenog snimka (radiografije) sa etalom (koji su podeljeni u nekoliko grupa — obično 5) i određuje prema dogovoru, šta je prihvatljivo a šta nije — da li se pojedini kontrolisani delovi ili cela količina zavarenih spojeva prima ili ne. U tom smislu treba tumačiti i odredbe tehničkih propisa o kvalitetu zavarenih spojeva za noseće čelične konstrukcije (tačka 3) u pogledu kvaliteta šavova (specijalni, I ili II kvaliteta; 100% prozračivanje, ili 50% ili manje).

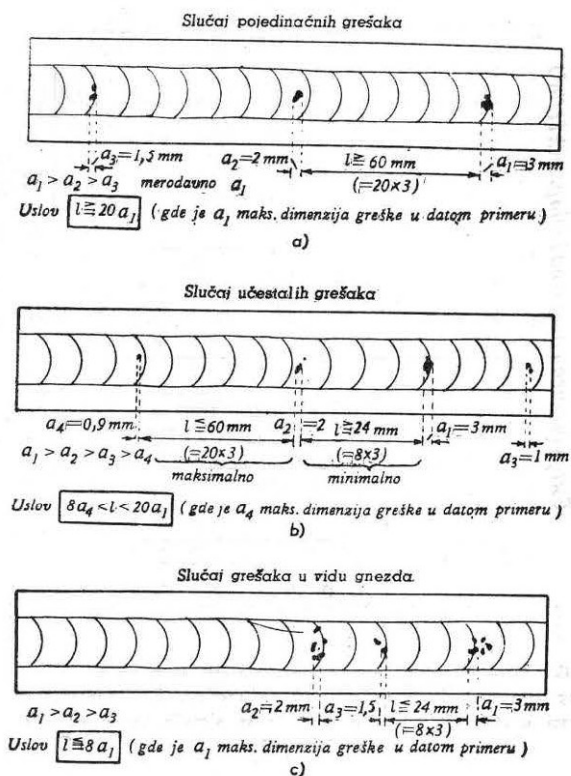
Naravno da u ovom slučaju treba unapred da bude utvrđeno koje su ocene prema usvojenoj referencnoj zbirci prolazne — prihvatljive, a koje ne. Prslina se isključuju unapred u svakom slučaju.

U ovom, prvom slučaju može se primeniti još jedan način procene kvaliteta izrađenog šava. Može se dati opis grešaka, dajući podatke o vrsti greške, veličini (na primer, najveći prečnik pore ili najveće uključine troske, zaletljenog mesta i dr.), učestanosti, pa merenjem njihovih veličina ukupnih dužina na unapred određenoj dužini odrediti podobnost za prijem ili ne (vidi sliku 19).

Ako je ovaj ugovor fiksiran propisom ili posebnim dogovorom, procenu kvaliteta šava na osnovu radiografskog snimka ili ultrazvučnog ispitivanja može da vrši i tehničar.

U drugim slučaju, treba proceniti značaj konstatovane greške na nosivost odnosno sigurnost zavarenog spoja, pa prema tome i same konstrukcije.

I ovde možemo razlikovati dva slučaja: 1.^o značaj pojedine vrste greške u šavu za nosivost šava, odnosno konstrukcije, i 2.^o značaj loma konstrukcije usled greške u šavu za ekonomsku štetu odnosno opasnost po ljudske živote. Prvi slučaj nas upućuje na istraživanje brojnih



Slika 19 — Definicija veličine grešaka prema Tehničkim propisima o kvalitetu zavarenih spojeva za noseće čelične konstrukcije. Prema veličini grešaka i njihovom međusobnom udaljenju, podeljene su na pojedinačne, učestale i greške u vidu gnezda.

vrednosti nosivosti šavova sa različitim greškama, a drugi na klasifikaciju konstrukcije s obzirom na opasnost od pojave loma.

Ako se zadržimo zasad na prvom slučaju, treba usvojiti kriterijum za procenu nosivosti šavova sa greškama. Zbog toga što ispitivanje zamorom oštrije pokazuje uticaj grešaka na lom spoja, nego, na primer, statičko napreznje, usvojeno je, da se procena vrši zamorom.* U tom cilju mnoge laboratorije vrše danas ispitivanja za utvrđivanje jačine zamora šavova sa određenim greškama. Kao osnovu za ovaj rad navešćemo početne rezultate dobivene u laboratorijama BWRA**, koji su poslužili kao pobuda i baza za program međunarodnog ispitivanja o kojem će biti reči u poglavlju 4.

* drugo je pitanje da li je dobiveni brojni podatak jačine zamora pravi pokazatelj uticaja greške u konstrukciji, ako se uzmu u obzir radni uslovi konstrukcije u eksploataciji. Međutim to ne umanjuje značaj ovog postupka kao indikatora ponašanja jednog spoja sa greškom ili bez greške, malom greškom ili velikom greškom, greškom blizu površine, ili oko sredine debljine preseka i slično.

** BWRA = British Welding Research Association.

3. Pregled dosadašnjih rezultata ispitivanja uticaja grešaka na jačinu zamora zavarenih spojeva

Rezultati dobiveni u BWRA rezimirani su dokumentima MIZ: XIII — 316 — 63, XIII — 336 — 64 i XIII — 343 — 64. Izučavane su dve vrste grešaka: neprovarena mesta i uključine.

Rezultati ovih, prvih ispitivanja su konfuzni; iz njih se još ne može izvući jednoznačan zaključak. Ono što su ovi opiti pokazali može se formulisati ovako:

3.1. Za ispitivanje uticaja grešaka na jačinu zamora, površine šavova moraju biti obrađene, da bi pri ispitivanju mogao da se posmatra samo jedan parametar — greška u šavu, a ne i uticaj koncentracije napona usled nadvišenja šava i sl.

3.2. Neprovarena mesta: malo smanjenje poprečnog preseka izaziva bitno smanjenje jačine zamora zavarenog spoja, ali ovo opadanje nije linearno sa porastom greške već se njen uticaj smanjuje sa relativnim povećanjem veličine greške.

3.3. Rezultati ispitivanja spojeva izradjenih bazičnim elektrodama (sa niskim sadržajem vodonika) i rutilnim elektrodama, daju sličnu sliku, sa napomenom, da su rezultati sa bazičnim elektrodama **stalno viši** nego rezultati dobijeni rutilnim elektrodama.

3.4. Naponsko odžarivanje izazvalo je u prvo vreme velike zabune, dok se nije uvidelo da ono uklanja uticaj sopstvenih napona, pa prema tome objašnjava uticaj različitih rezultata jačine zamora pri različitom dubinskom položaju greške. Međutim pored povišenja jačine zamora posle naponskog odžarivanja (u oba slučaja — i rutilnih i bazičnih elektroda) nije potpuno jasan odnos rezultata pri diskretnim i kontinualnim greškama.

3.5. Uključine troske su ispitivane na limovima debljine 12 i 38 mm. Dolazi do iste pojave kao i u slučaju 3.2. tj. da malo smanjenje poprečnog preseka izaziva bitno smanjenje jačine zamora zavarenog spoja sa greškom, ali da ovo opadanje nije linearno sa povećanjem greške, već se njen uticaj smanjuje sa relativnim povećanjem veličine greške. Ova ispitivanja pokazuju međutim da nisu samo ovo parametri koji utiču na jačinu zamora i da je problem kompleksniji. Za sada se uzimaju u razmatranje:

- veličina greške,
- tip obloge elektrode,



- predgrevanje,
- naponsko odžarivanje,
- debljina materijala,
- položaj greške po debljini poprečnog preseka,
- naponski odnos $\min \delta / \max \delta$.

Evo nekoliko primera rezultata ovih ispitivanja:

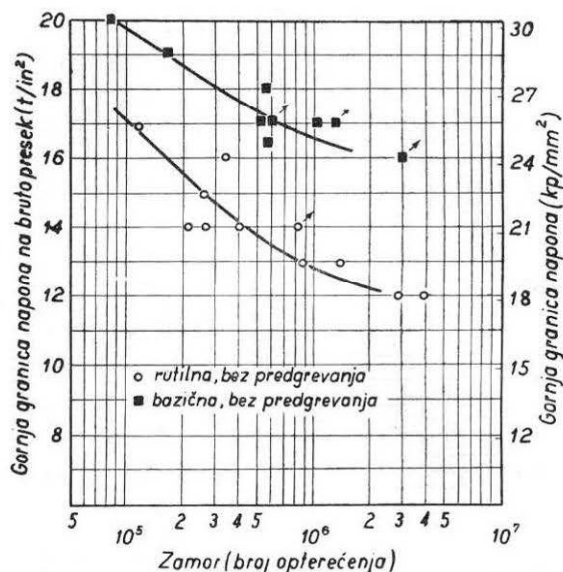
Slika 20 prikazuje rezultate ispitivanja zamorom epruveta od istopljenog materijala rutilnom i bazičnom elektrodom.

Slika 21: sučeoni spoj sa rupom $\varnothing 3$ mm u sredini. Šav je izradjen u jednoj seriji sa rutilnom elektrodom, a u drugoj bazičan. Zavarivanje je izvršeno bez predgrevanja.

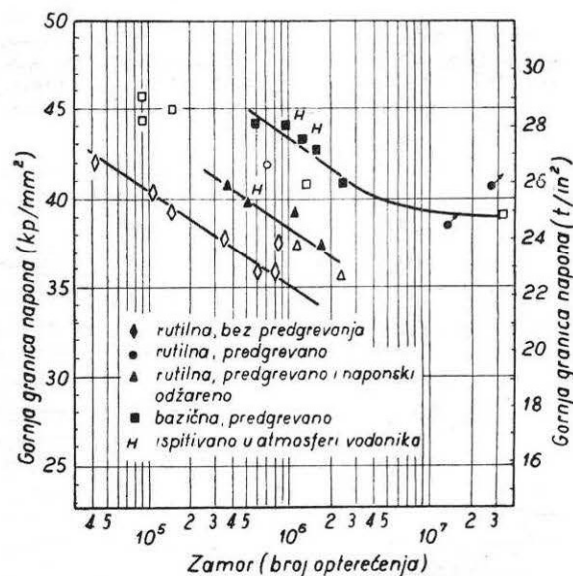
Slika 22: sučeoni spoj sa dva zarezra $r = 0,25$ mm, dubine 2 mm na bokovima epruvete. Rutilni šavovi su ispitivani: bez toplotne obrade, sa predgrevanjem, i sa predgrevanjem i naponskim odžarivanjem; bazični šavovi bez toplotne obrade. Rezultati pokazuju uticaj predgrevanja: $\delta_D = 7,5$ kp/mm² bez predgrevanja; 7,0 kp/mm² sa predgrevanjem; 5,5 kp/mm² sa predgrevanjem i naponskim odžarivanjem. Ovo su neočekivani rezultati, koje još naknadno treba proveriti i objasniti.

Slika 23: sučeoni spoj sa tri uključine troske po 6 mm dužine po sredini visine; rutilna elektroda. Rezultat ispitivanja: bez predgrevanja $\delta_D = 19,5$ kp/mm²; sa predgrevanjem $\sigma_D = 12,8$ kp/mm²; sa predgrevanjem i naponski odžarivano $\delta_D = 24,5$ kp/mm². Pada u oči sniženje jačine zamora pri predgrevanju.

Slika 24: sučeoni spoj sa tri uključine troske po 6 mm blizu spoljne površine; rutilna elektroda. Rezultat ispitivanja: bez predgrevanja $\delta_D = 11,8$ kp/mm²; sa predgrevanjem $\sigma_D = 14,2$ kp/mm²; sa predgrevanjem i naponski odžarivano $\delta_D = 22,1$ kp/mm². Rezultati bez predgrevanja bi se mogli protumačiti uticajem sopstvenih napona: ako je greška bliže površini, onda je ona (ako je i lom pošao od greške u osovini epruvete) u zoni zatežućih sopstvenih napona, pa je i jačina zamora niža: 11,8 prema 19 kp/mm². Ako su ove pretpostavke tačne, rezultati epruveta koje su bile naponski odžarene trebalo bi da se nalaze između ove dve vrednosti i da budu približno jednake. One jesu približno jednake (24,5 i 22,1) ali je vrednost jačine zamora za slučaj grešaka u sredini visine pomeren u suprotnom smeru od očekivanog. Ovo ukazuje da osim sopstvenih napona ima i drugih parametara koji igraju ulogu. Uloga predgrevanja takodje nije jasna.

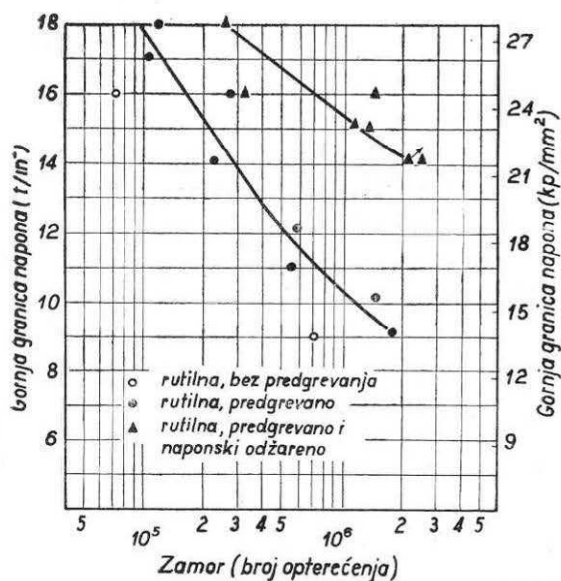


Slika 20 — Rezultati ispitivanja zamorom, epruveta od istopljenog letala rutilnom i bazičnom elektrodom. Beli (nezacrnjeni) znaci označavaju epruvete koje su se slomile počev od sitnih grešaka u šavu.

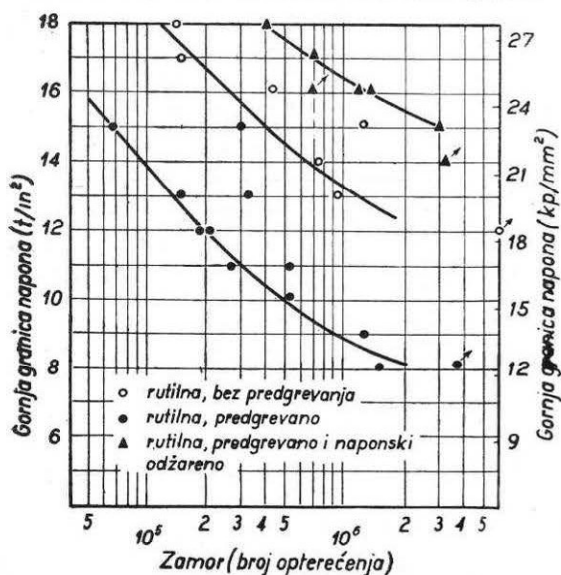


Slika 21 — Rezultati ispitivanja zamorom sučeonog spoja, sa obradenim licem i korenem šava i rupom prečnika 3 mm u sredini.

Slika 25: sučeoni spoj sa kontinualnom uključinom troske. Rezultat ispitivanja: predgrevano $\delta_D = 17,4$ kp/mm²; predgrevano i naponski odžarivano $\delta_D = 13,4$ kp/mm².



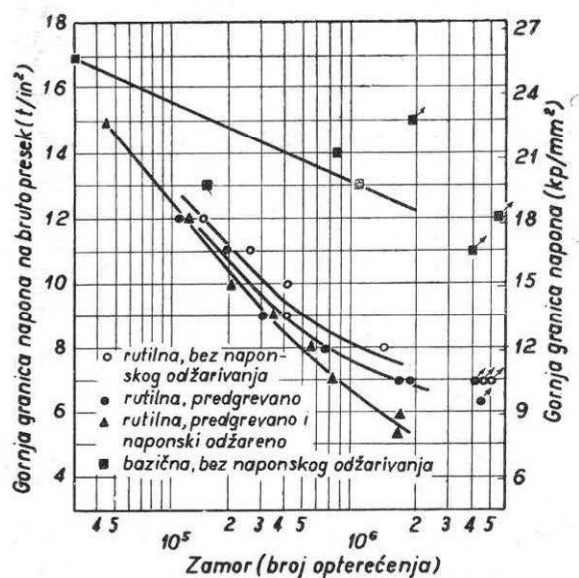
Slika 22 — Rezultati ispitivanja zamorom sučeonog spoja sa obradenim licem i naličjem bez unutrašnjih grešaka ali sa dva zarezca $r = 0,25$ mm, dubine 2 mm, na bokovima epruveta.



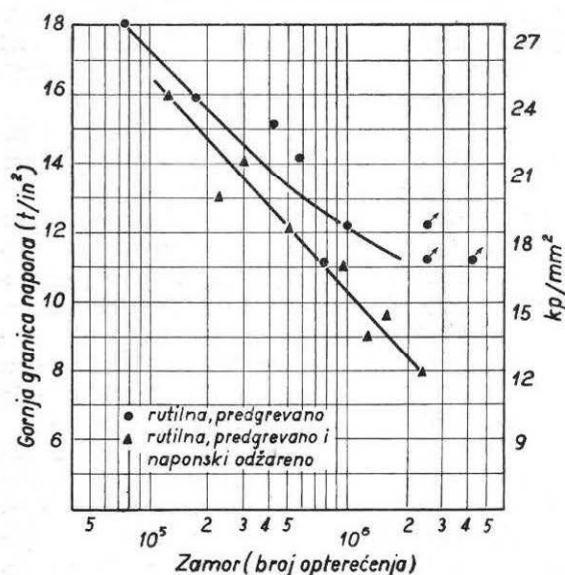
Slika 23 — Rezultati ispitivanja zamorom šava sa tri uključine troske po 6 mm dužine po sredini visine šava. Šav je izraden rutilnom elektrodom bez toplotne obrade i sa toplotnom obradom.

Slika 26: sučeoni spoj sa kontinualnom uključinom troske blizu površine; rutilna elektroda. Rezultat ispitivanja: predgrevano $\delta_D = 12,5$ kp/mm²; predgrevano i naponski odžarivano δ_D , 11,8 kp/mm².

Ako analiziramo rezultate sa slika 25 i 26 sa onima iz 23 i 24, nema zadovoljavajućeg objašnjenja, ako se uzme u obzir samo parametar



Slika 24 — Rezultati ispitivanja zamorom šava sa tri uključine troske po 6 mm dužine blizu spoljne površine. Šav je izraden rutilnom elektrodom bez i sa toplotnom obradom.



Slika 25 — Rezultati ispitivanja zamorom šava sa kontinualnom uključinom troske u sredini visine šava. Šav je izraden rutilnom elektrodom sa predgrevanjem i sa predgrevanjem i naponskim odžarivanjem

sopstveni naponi. Medjutim rezultati dobijeni na slikama 25 i 26 lepo se slažu medju sobom. Naponsko odžarivanje epruveta sa uključinom u sredini visine (u pritisnutoj zoni sopstvenih napona) smanjuje jačinu zamora, a u slučaju greške blizu površine praktično nema uticaja (jer se uticaji različitih parametara pri tome poništavaju). Ali su praktično — posle napon-



skog odžarivanja obe jačine zamora (greška u sredini visine i greška blizu površine) ove jačine jednake. S druge strane niža vrednost jačine zamora epruvete bez naponskog odžarivanja (samo predgrejanih) sa greškom blizu površine, od onih sa greškom u sredini može se objasniti postojanjem sopstvenih napona. Znači u ovoj seriji je parametar sopstveni naponi bio dovoljan da objasni dobivene rezultate.

Pretpostavlja se da je jedan od parametara koji utiče na ove rezultate — postojanje vodnika u metalu šava.

Slika 27: Pregled ranijih ispitivanja uticaja različitih parametara morfologije šava na jačinu zamora:

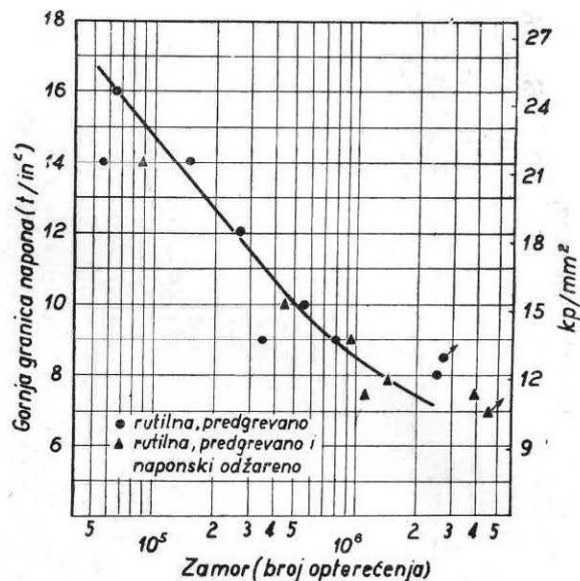
- (1) obradjen šav (24,5 kp/mm²),
- (2) neobradjen šav ali lice vrlo dobro (15,3 — 17,1 kp/mm²).
- (3) rdjav oblik nadvišenja (10,6 kp/mm²),
- (4) sa podložnom pločicom (10 kp/mm²).

Nije pravljen razlika između ručnog i zavarivanja APP — što znači da važi i za jedan i za drugi način izrade. Isto tako nije uzimana u obzir toplotna obrada. Tri poslednja slučaja pokrivaju oblast šavova bez obrade, onakvi kakvi su posle zavarivanja, sa jednim ograničenjem da nema zarez.

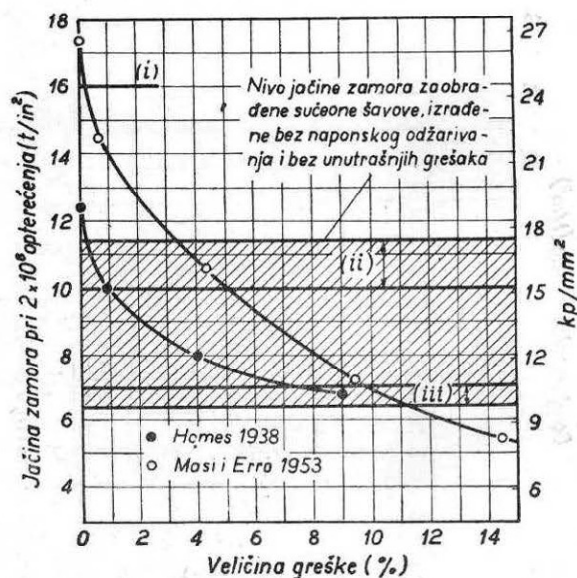
Na slici su uneti i rezultati ranijih ispitivanja (Homes 1938: poroznost; i Masi i Erra 1953: poroznost i uključine troske) koji pokazuju tipičnu sliku opadanja jačine zamora sa procentualnim povećanjem greške (u procentima merodavnog preseka; vrednosti su izmerene fotometrijski na rendgenskim snimcima. Oblik ovih krivih je tipičan — sa povećanjem veličine greške jačina zamora opada. Krive su povučene kao srednje vrednosti; rasipanje je znatno. Linije imaju samo kvalitetan značaj.

Slika 28: Opšti pregled rezultata sa različitim greškama. Vidi se prihvatljiva korelacija između jačine zamora (2×10^6) i relativne jačine (pri 6×10^5) između rutilnih i bazičnih elektroda. Ovo sve naravno pri istoj širini i debljini epruveta. Uticaj veličine grešaka i položaj po visini preseka nije mogao biti razjašnjen. To je ostalo da se reši opitima koji su sad u toku.

Slika 29: Uporedjenje jačine zamora šavova sa greškom i dozvoljenog napona za dinamički napregnute konstrukcije prema Britanskom standardu za pune limene nosače (BS 153/1962), za šavove izradjene sa bazičnim elektrodama. Učrtane linije predstavljaju šavove sa različitim greškama: DIBY8 — tri greške 1,5 do 2,5 mm; DIBY1 — jedna greška 4 do 9 mm; DIBY5



Slika 26 — Rezultati ispitivanja zamora šava sa kontinualnom uključinom troske blizu površine. Toplotna obrada kao i u slici 25.



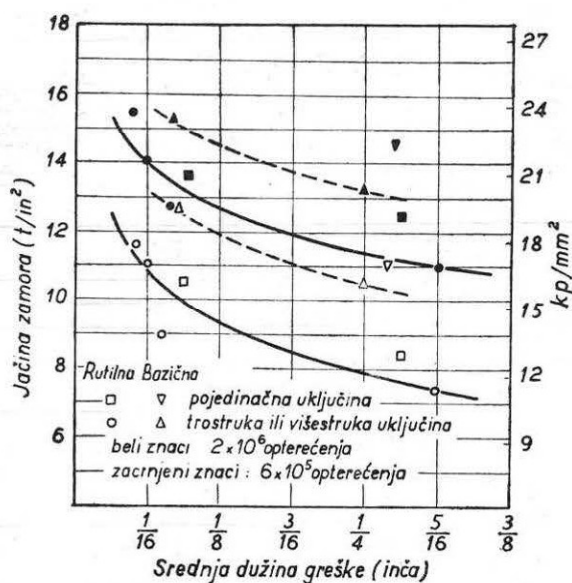
Slika 27 — Uporedjenje ranijih ispitivanja šavova sa greškama i šavova bez unutrašnjih grešaka ali sa različitim morfologijom oblika.

— tri greške sa ukupnom dužinom od 18 do 27 mm.

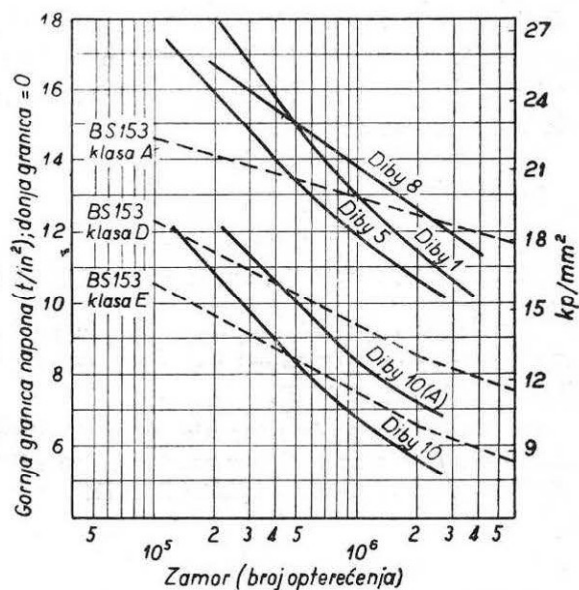
Odnos grešaka 2 : 7 : 22 ili 1 : 3,5 : 7
odnos jačina zamora 12,5 : 11,5 : 10,5 ili
1 : 0,92 : 0,87.

Ovi podaci pokazuju da ne postoji linearost između veličine greške i jačine zamora.

Epruvete DIBY10 i DIBY10A su šavovi izradjeni bazičnom elektrodom, a imaju kontinualnu uključinu, ali je DIBY10 bliža površini.

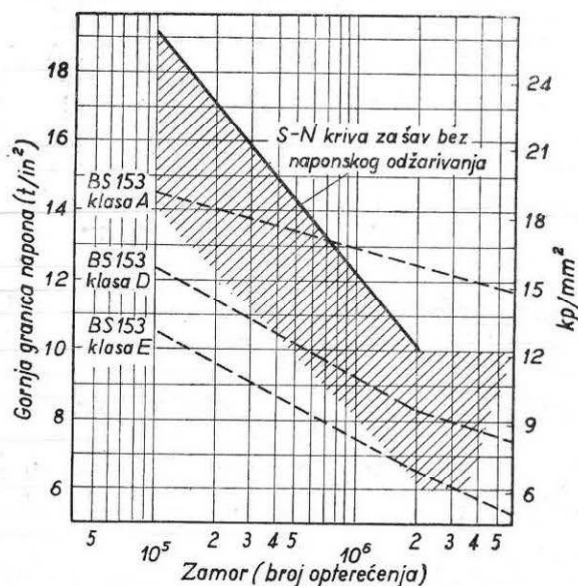


Slika 28 — Opšti pregled rezultata ispitivanja zamorom (stanje 1963. godine).



Slika 29 — Uspoređenje jačine zamora šavova sa greškama izrađenih bazičnom elektrodom sa dozvoljenim naponima prema Britanskom standardu BS 153 za različite klase

Iz slike se vidi da ugledi DIBY8, DIBY1 i DIBY5 odgovaraju za klasu D i E za puni vek trajanja (2×10^6) a ugled DIBY10A za klasu E, a za klasu D samo ako broj opterećenja ne prelazi 4×10^5 . Ugled DIBY10 odgovara samo za klasu E ako broj opterećenja ne prelazi 4×10^5 .



Slika 30 — Podaci prema Britanskom standardu BS 153 za dozvoljene napone za različite klase konstrukcija odnovo delova. U taj dijagram uneti su podaci za sučeoni zavareni spoj bez greške (puna linija) i označena površina u kojoj bi se mogle kretati jačine zamora šavova sa greškama (šrafirana zona).

Slika 30: prikazuje podatke prema Britanskom standardu BS 153/62 za dozvoljene napone za različite klase konstrukcija, odnosno delova konstrukcija. U taj dijagram uneti su podaci za sučeoni zavareni spoj bez greške (puna linija), i označena površina u kojoj bi se mogle kretati jačine zamora šavova sa greškama (šrafirana zona). Ako se dozvole šavovi klase D i E, onda nas interesuje, koje greške možemo dozvoliti, da bi njihova jačina zamora bila negde u šrafiranoj zoni na slici 30. Cilj ispitivanja bi bio, da se odrede greške (uključine) po veličini, položaju u šavu, i međusobnom rasporedu, pa da njihova jačina zamora leži u šrafiranoj zoni.

4. Program međunarodnog ispitivanja uticaja grešaka

Opšti zaključak dosadašnjih ispitivanja koje je vršeno u BWRA i u drugim zemljama i analizirano u Komisiji XIII Međunarodnog instituta za zavarivanje je, da često

— mali spoljni defekti, veličine koja se obično ne smatra da je takva da bi spoj trebalo odbaciti — deluju kao začetnici pojave zamora pre nego velike greške*.

* Treba ipak imati na umu da se radi o epruvetama koje su bile napregnute dosta visoko (iznad $16 kp/mm^2$).



PREDLOŽENI PROGRAM MEĐUNARODNOG ISPITIVANJA

Tablica 1.

TIP ELEKTRODE	R U T I L N A						B A Z I Č N A																															
	Bez pred- grevanja		Sa pred- grevanjem		Bez pred- grevanja naponski odžareno		Sa pred- grevanjem naponski odžareno		Bez pred- grevanja		Sa pred- grevanjem		Bez pred- grevanja naponski odžareno		Sa pred- grevanjem naponski odžareno																							
Odnos min/max	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	1	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2	-1	0	+1/2								
Vrsta greske	debjina mm																																					
Kontinualna uključina	12,5																																					
troške u sredini	B1		X1*		B2		X2*		A1		X3*		A2		X4*		Z1*		Z2*		Z1*		Z2*		Z1*		Z2*		Z1*		Z2*							
debljine	33		E1		X5*		E2		X6*		X7*		X8*																									
Kontinualna uključina	12,5																																					
TROŠKE bl. površine	38																																					
3 uključine po 6 mm duž. u sredini	12,5		B3		D1		D2		D3		D4		B4		X1*		D5		A3		X11*		A4		Y1		X9*		C2		C3		C4		C5		C6	
debljine	38		E5		X12*		E9		X13*		E4		X14*		X15*																							
3 uključine po 6 mm duž. blizu površine.	12,5																																					
	25																																					
	38																																					

* označava seriju koja je ispitivana ranije, slovom Y i Z označene su varijante za serije A i B.

— naponsko odžarivanje predgrevanih ugleda izaziva znatno povišenje jačine zamora sa diskretnim greškama, ali ne i sa kontinualnom uključinom. Ovo bi trebalo daljim opitima razjasniti, jer iz dosadašnjih analiza proizilazi da ima i drugih parametara koji utiču na jačinu zamora ovih šavova,

— izgleda da sopstveni naponi imaju znatan uticaj na jačinu zamora s obzirom na položaj greške po dubini preseka.

Da bi se ova pitanja razjasnila Komisija XIII MIZ je utvrdila program za ispitivanje uticaja dve vrste uključina troske:

— kontinualna linija uključina,
— tri uključine dužine po 6 mm, na rastojanju od 25 mm, i pozvala nacionalne delegacije — svoje članice da preuzmu zajedničko ispitivanje. Predviđeno je da pet laboratorija, označenih slovima A, B, C, D i E preuzmu ispitivanje prema programu prikazanom u tablici 1. Serije označene sa X su dosad ispitane serije. Sa ovim programom bi trebalo postići:

Laboratorija A i B.

4.1. Uticaj dimenzija grešaka, uporedjenjem rezultata A1 sa A3, B1 sa B3 i A2 sa A4, B2 sa B4;

4.2. uticaj naponskog žarenja, uporedjenjem parova rezultata 1 sa 2 i 3 sa 4.

Rezultati laboratorija B mogu se direktno uporediti sa rezultatima X1, X2, X9 i X10, a rezultati laboratorije A sa rezultatima X3, X4 i X11 — ali svi pri čistom naizmeničnom optere-

ćenju umesto čistog jednosmernog opterećenja. Ovo će ispitivanje dati informacije o uticaju odnosa napona i služice kao kontrola rezultata X koji su dosad dobijeni.

Laboratorija C.

Glavni parametri za izučavanje su:

4.6. odnos naprezanja, uporedjujući D2, D3 i D4.

4.7. uticaj predgrevanja, uporedjujući D1 sa D3 (može se uporediti ovaj par rezultata sa C1 i C2, X12 i X13, E3 i E5).

4.8. uticaj naponskog žarenja uporedjenjem D3 sa D5 (može se ovaj par rezultata uporediti sa X5 i X6, C2 i C4, X13 i X14 i E3 i E4).

Laboratorija D.

Parametri koje treba ispitivati jesu:

4.3. predgrevanje, uporedjenjem serije C1, sa C2 i po mogućnosti C3 sa C4,

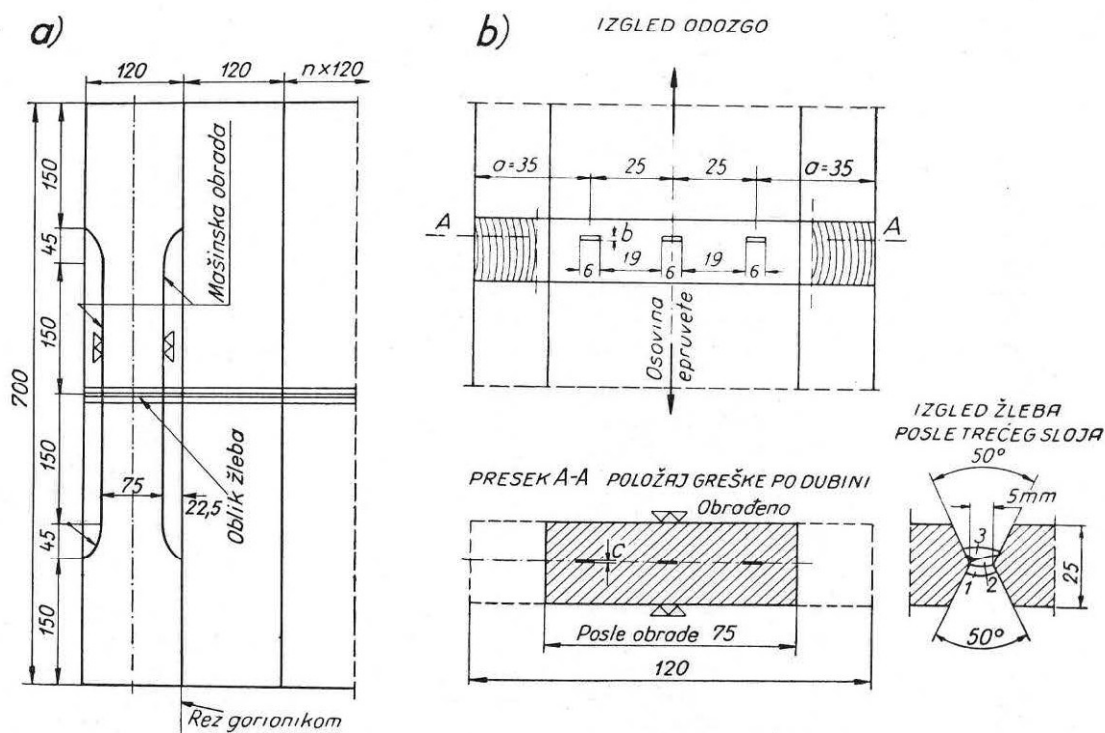
4.4. uticaj naponskog odžarivanja, uporedjenjem C1 sa C3, C2 sa C4 i C5 sa C6,

4.5. uticaj primene različitih elektroda, uporedjenem C1 sa C5 i C3 sa C6.

Ova shema će dati direktno uporedjenje za uticaj debljine, uporedjenjem C1, C2, C4 i C5 sa X12, X13, X14 i X15, a C1, C3 i C5 sa X9, X10 i X11; a C1, C2 i C4 sa D1, D3 i D5.



UTICAJ GREŠKE NA JAČINU ZAMORA



Slika 31 — Oblik epruvete za grupu C iz međunarodnog pro-grama ispitivanja uticaja grešaka na jačinu zamora zavarenog sučeonog spoja.

a) oblik epruvete i način isecanja iz lima, b) položaj grešaka u epruveti: izgled odozgo, presek A—A i položaj greške posle trećeg zvara. U slici su upisane dimenzije koje su propisane: dimenzije b i c nisu propisane (c = približno 1 mm).

Laboratorija E

Parametri koje treba ispitivati:

- 4.9. uticaj veličine greške, uporedjenjem E1 sa E3 i E2 sa E4.
- 4.10. uticaj naponskog žarenja, uporedjenjem E1 sa E2 i E3 sa E4.
- 4.11. uticaj predgrevanja, uporedjenjem E3 sa E5.

Laboratorija A je Francuska, B je Zap. Ne-

mačka, C je Jugoslavija, D je Holandija i Laboratorija E je BWRA (Engleska).

Oblik epruvete sa greškama za grupu C dat je u slici 31.

Ovi opiti su u toku. O rezultatima će biti saopšteno posle završetka opita i njihovom sredjivanju.



Stojan Sedmak

Glavni i odgovorni urednik časopisa od 1989 - 2000. godine

Reprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije broj 3, 2005. godina, str. 141-146.

Prof. dr Stojan Sedmak, dipl. ing.

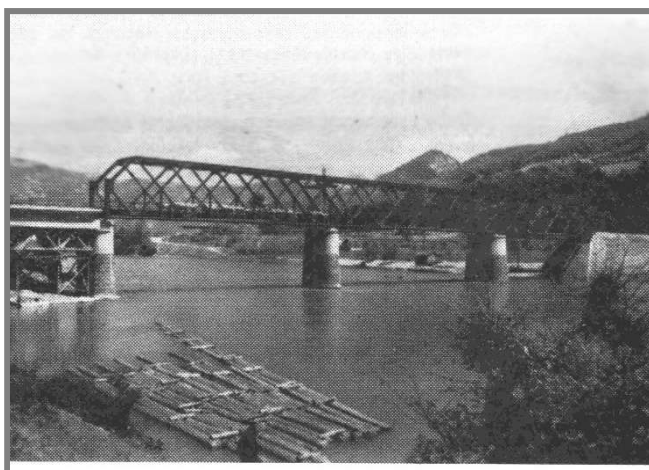
RAZVOJ ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

sa posebnim osvrtom na period 1989 - 2000.

Časopis "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", glasilo Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS) pod ovim imenom izlazi 10 godina, od 1996. godine. Uvodnik u broju 1. od 1996. (volumen 41) je prikazao poznatu istoriju razvoja časopisa, iz koje se vidi da je ovaj domaći časopis zavarivača i osoblja u zavarivanju, kao glasilo DUZS, menjao naziv. Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji je osnovano 1952, a 1953. godine je izdat prvi broj glasila pod nazivom "Bilten". Stručni časopis "Zavarivač" se javlja 1954. godine paralelno sa "Biltenom", kao zajedničko izdanje DUZS i Društva za tehniku zavarivanja Hrvatske. Posle izvesnog zastoja u izdavanju, časopis "Zavarivač" se ponovno javlja 1958. godine pod uredništvom prof. Milana Radojkovića, sa naznakom da je to treća godina izlaženja, i to je usvojeno kao početak kontinualnog izdavanja časopisa. Namena "Biltena", kao glasila zavarivača u našoj zemlji, bila je da obaveštava zainteresovane o događajima i razvoju u ovoj oblasti. Naziv "Zavarivač" upućuje čitaoca na pomisao da je ovaj časopis, kao stručno glasilo, prevashodno namenjen zavarivačima, kao najvažnijim i najbrojnijim učesnicima u izvođenju zavarivanja i proizvodnji zavarenih konstrukcija. U vreme kada je časopis dobio ime "Zavarivač" takav pristup je bio opravdan.

Posle početne faze uvođenja zavarivanja kod nas, a i u svetu, u kojoj su obaveštenja bila značajna, nastupila je faza u kojoj je bilo najvažnije obučiti zavarivače da kvalitetno izvedu zavarene spojeve i obezbede potrebni integritet konstrukcije. Treba se podsetiti da je zakivanje bilo dominantan način spajanja elemenata konstrukcije u to vreme, i da je bilo potrebno ne samo uvesti zavarivanje kao zamenu za zakivanje, nego i dokazati da je to mnogo bolji i ekonomičniji postupak spajanja.

Taj zadatak nije bio ni malo jednostavan. Prvi primer koji to dokazuje su zavareni mostovi. Na slici 1 je prikazan most preko Drine, raspona 37 + 44,4 + 37 m, projekat doajena zavarivanja kod nas prof. Milana Radojkovića (1909-1981.), izveden u vidu zavarene konstrukcije 1936. godine [1]. Međutim, neobjašnjivi lomovi zavarenih konstrukcija su doveli u pitanje mogućnost primene zavarivanja, kao što je bio slučaj sa mostovima, npr. most kod Rudesdora u Nemačkoj i most kod Haselta u Belgiji, prikazan na slici 2, srušeni su 1938. godine, već u ranoj fazi uvođenja zavarivanja [1], a da njihov lom nije u to vreme mogao biti u potpunosti objašnjen.

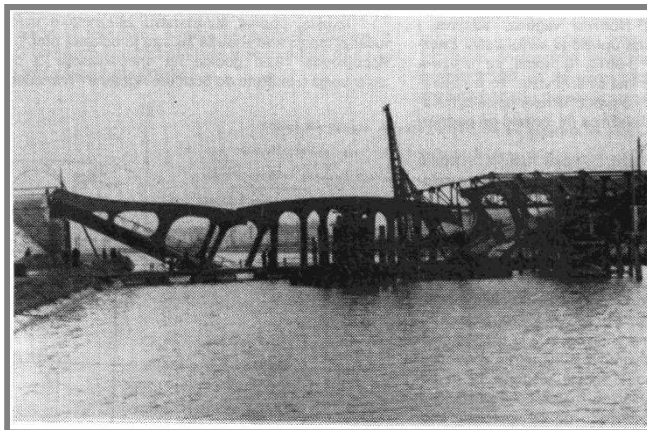


Slika 1: Most preko Drine, raspona 37 + 44,4 + 37 m, izveden zavarivanjem, projekat prof. M. Radojkovića

Interesantan je izveštaj o lomovima ovih mostova prof. Radojkovića, konstruktora devet mostova zavarene konstrukcije počev od 1933, u kome kaže: "Uzroke rušenja svakako treba tražiti u problemima nedovoljnog poznavanja rezidualnih napona, nedovoljnog poznavanja zavarivanja po konturama šavova, kao i u neophodnosti primene elektroda visoke čvrstoće i velike plastičnosti". Već ovo saznanje usmerava na potrebu da se zavarene konstrukcije analiziraju počev od



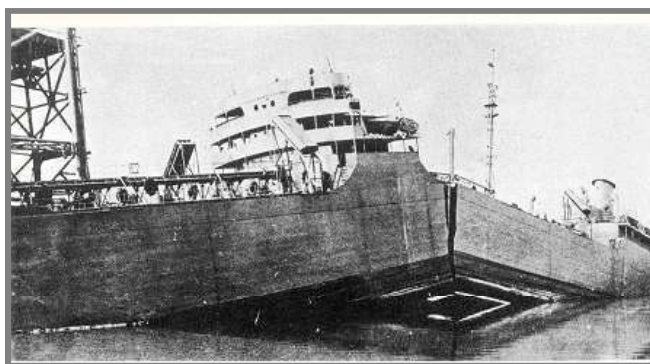
faze projektovanja pa sve do isteka predviđenog veka, pri čemu su uočeni problemi ostali aktuelni do današnjih dana. Na osnovu podnetog izveštaja Ministarstvu železnica, prof. Radojković je bio na specijalizaciji u Institutu za autogeno zavarivanje u Parizu tokom 1938. radi dubljeg proučavanja loma mosta kod Haselta i nekoliko mostova u Nemačkoj.



Slika 2: Izgled srušenog mosta kod Haselta u Belgiji [1]

U ranoj fazi razvoja i uvođenja zavarivanja je kvalitet zavarivanja i zavarenih spojeva je ocenjivan na osnovu majstorstva zavarivača, njihove veštine da izvedu zavareni spoj na najbolji moguć način i renomea koji su uživali na osnovu već izvedenih konstrukcija. Kako je usavršavanje zavarivača u tom periodu uglavnom zavisilo od njih samih i od njihove želje, ali i od sposobnosti i sklonosti da ostvare vrhunske rezultate, to se majstorstvo u zavarivanju cenilo kao izuzetno teško dostižno, i ne retko je tretirano kao veština i umetnost. Časopis "Zavarivač" je svojim priložima doprineo da se to majstorstvo i postigne. Zavarivači obučeni i usavršavani na prostoru bivše Jugoslavije su bili cenjeni širom sveta, a značajna je uloga časopisa u dostizanju tog nivoa. I dugo posle rane faze je taj nivo proizvodnje u zavarivanju bio dominantan. U prvim publikacijama DUZS takav je pristup prepoznatljiv.

Formiranjem Međunarodnog instituta za zavarivanje - MIZ (International Institute of Welding / Institute International de la Soudure – IIW/IIS) 1948. i pristup zavarivanju se postepeno menja. Jedan od osnovnih razloga su i neobjašnjivi lomovi zavarenih konstrukcija, koji su se pojavili kod mostova, ali i kod brodova, slika 3 [2], kao i kod drugih konstrukcija izvedenih zavarivanjem. Međutim, to se u časopisu "Zavarivač" tretira sporadično, već u skladu sa nivoom razvoja zavarivanja kod nas. Potreba da se zavarivanje kod nas dalje razvija je uslovlila da je tadašnja Jugoslavija postala jedan od prvih članova MIZ (1953.) i jedan od prvih organizatora Godišnje skupštine MIZ (Opatija, 1959), što je omogućilo da se dostignuća MIZ brzo i efikasno prenese i na naše prostore.



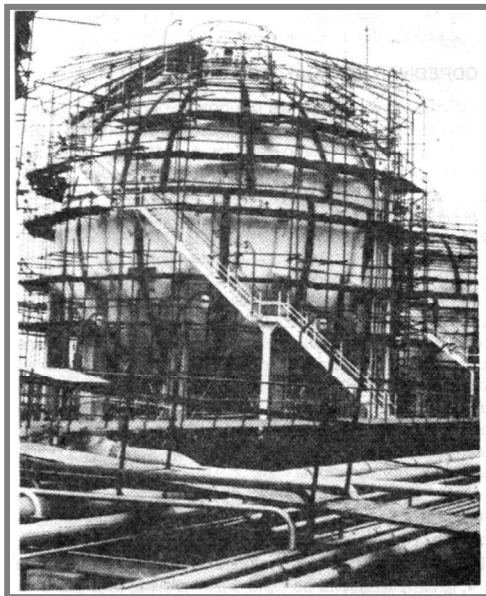
Slika 3: Brod "Skenektedi", zavarene konstrukcije, slomljen na dva dela 16. januara 1943 [2]

Stručni i naučni pristup sve više potiskuje majstorstvo zavarivača u primeni zavarivanja, što se ogleda i u upotrebi posebnog obrazovanja kadrova za zavarivanje. Tako francuski Institut za zavarivanje uvodi jednogodišnju Školu za inženjere zavarivanja, čime se težište razvoja zavarivanja prenosi sa zavarivača na inženjere zavarivanja. Ovo je bilo neophodno da bi zavarivanje konačno istisnulo zakivanje kao postupak spajanja u većini konstrukcija. Već sedamdesetih godina je i kod nas standardom propisan program obrazovanja inženjera zavarivanja, koji je sa velikim uspehom i primenjivan. Veliki broj inženjera angažovanih u zavarivanju doprinosi sve detaljnijem poznavanju procesa zavarivanja, uvođenju novih postupaka zavarivanja, primeni materijala sve veće čvrstoće i sve složenijih osobina, što se sve odražava i na potrebu detaljnije analize konstrukcija, njihovog ponašanja u eksploataciji i integriteta. Takav razvoj se odražava i na radove koje objavljuje časopis "Zavarivač", u kojima se sve više problemi obrađuju na osnovu teorijskih i eksperimentalnih istraživanja.

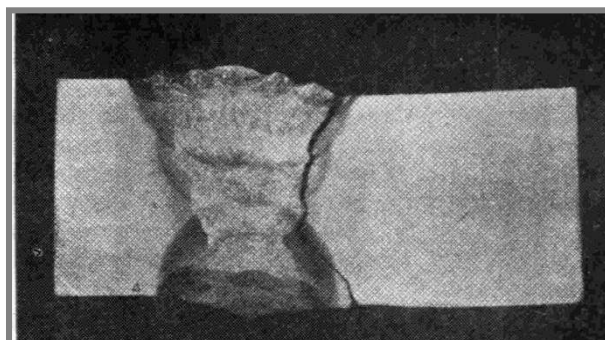


Novi uslovi zahtevaju i nove pristupe, pa se nameće potreba sve detaljnijeg definisanja zahteva kvaliteta. Konačno se kroz seriju standarda ISO 9000 kristališu novi, veoma složeni zahtevi. Postupak zavarivanja u pogledu kvaliteta je u tim standardima definisan kao specijalni postupak, čime je označeno da se kvalitet zavarenih spojeva ne može oceniti posle svih izvedenih operacija zavarivanja, već se mora tokom izvođenja ugraditi u zavareni spoj. Posledice ovakvog zahteva se ogledaju u izdavanju značajnog broja standarda, neophodnih za ostvarenje postavljenog kvaliteta. Među njima posebno mesto zauzimaju JUS ISO 3834, koji definiše zahteve kvaliteta pri zavarivanju, i standardi za ispitivanje stručne osposobljenosti zavarivača (JUS EN 287), za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja (JUS EN 288), i za kriterijume prihvatljivosti grešaka zavarenih spojeva (JUS ISO 5817 i JUS ISO 10042), koji propisuju mere kako se zahtevani kvalitet može ostvariti i čime se dokazuje nivo ostvarenog kvaliteta. Koliki je značaj tome pridavan u našoj sredini, najbolje ilustruje činjenica da su propisani međunarodni i evropski standardi prevedeni na naš jezik neposredno posle objavljivanja njihovog originala. Opštim nivoom razvoja i primene zavarivanja kod nas su stvoreni uslovi da DUZS u saradnji sa Jugoslovenskim zavodom za standardizaciju (SZS) izda 1996. godine Zbirku standarda "Obezbeđenje kvaliteta u zavarivanju". Izdavanje ove Zbirke je povereno redakciji časopisa, koji od te godine izlazi pod novim naslovom "Zavarivanje i zavarene konstrukcije".

Broj 1/1996. časopisa donosi i radove sa stručnog skupa "Obezbeđenje kvaliteta u zavarivanju i tehnička regulativa", koji je obradio pregled stanja i dao podloge za primenu novih propisa i uvođenje u zavarivanje sistema ISO 9000. Time je na poseban način označeno da se sa nivoa doprinosa razvoju majstorstva prelazi na nivo generalnog kvaliteta zavarenih konstrukcija preko kvaliteta zavarivanja. Taj prelaz će biti ilustrovan jednim primerom, otkazima zavarenih spojeva sfernih rezervoara. Ovaj problem se pojavio sa uvođenjem čelika povišene čvrstoće (nazivni napon tečenja 470 do 500 MPa), mikrolegiranog vanadijumom, za izradu sfernih rezervoara. Posle nekoliko godina eksploatacije dolazi do procurivanja na ovim rezervoarima, namenjenim za smeštaj tečnih ugljovodoničnih gasova. Problem se javlja širom sveta, pa i na rezervoarima proizvedenim u Jugoslaviji. Prevod Dokumenta MIZ Doc. IIS-IIW 997-88 (ranije IX-1516-88), koji je pripremio I. Hrivnjak pod nazivom "Oštećenja i reparatura velikih sfernih rezervoara za tečne ugljovodonične gasove" [3]. Na slici 4. je prikazan reparirani sferni rezervoar zapremine 2000 m³, a na slici 5. izgled prsline kroz koju je došlo do procurivanja.



Slika 4: Sferni rezervoar zapremine 2000 m³ posle reparature

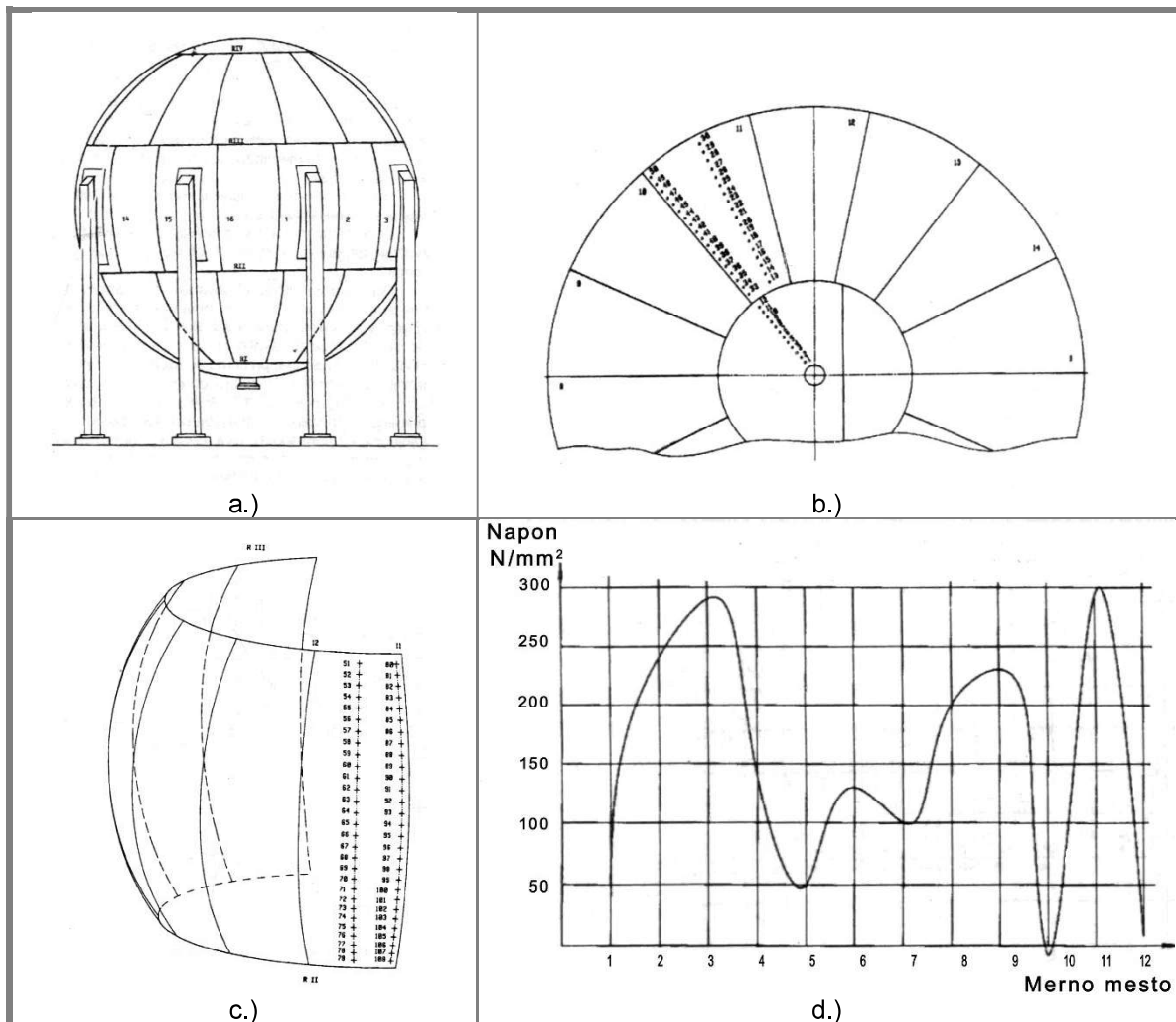


Slika 5: Prolazna prsline kroz zonu uticaja toplote koja je uslovlila procurivanje



Iako je kod nas ovaj problem bio predmet velikog interesovanja vlasnika i proizvođača rezervoara, inspekcijskih službi i istraživačkih institucija (instituta i fakulteta), ipak je mali broj objavljenih radova posvećen tom problemu. Problem zaostalih napona, koji je prof. Radojković smatrao jednim od glavnih uzročnika otkaza mostova, je tretiran u radu [4] prikazom rezultata merenja na sfernom rezervoaru posle izvedene reparature.

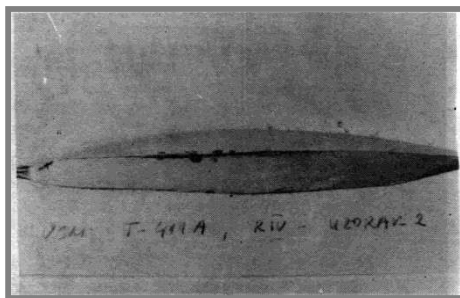
Reparatura je izvedena zavarivanjem ili brušenjem prslina, koje su utvrđene ispitivanjem bez razaranja. Na slici 6. prikazan je sferni rezervoar, sa mernim mestima 1. do 50. i 51. do 108, i sa raspodelom zaostalih napona na mernim mestima 1. do 12.



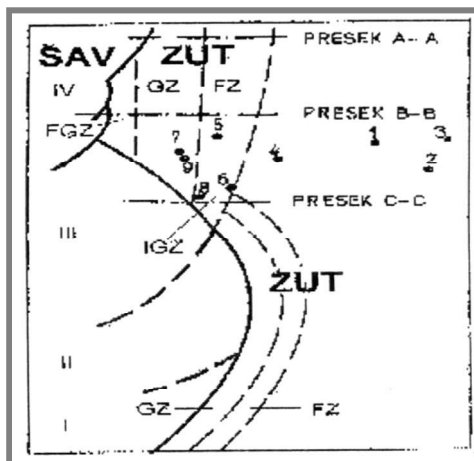
Slika 6: Sferni rezervoar (a) sa rasporedom mernih mesta 1. do 50 (b) i 51. do 108 (c) za merenje zaostalih napona i raspodelom zaostalih napona na mernim mestima 1. do 12 (d)

Dalji doprinos rešavanju problema sfernih rezervoara se odnosi na ispitivanje i ocenu stanja u eksploataciji [5]. Rezultati ispitivanja su pokazali veoma veliki broj otkrivenih prslina, tako da su sve ispitane sfere morale da budu sanirane pre dalje eksploatacije da ne bi došlo do procurivanja. Jedna karakteristična prslina na uzorku tipa "čamčić" je prikazana na slici 7. Sledeći rad [6] upravo obrađuje sanaciju prslina u zavarenim spojevima sfernih rezervoara od finostrukturnih čelika, a može se smatrati nastavkom rada [3].

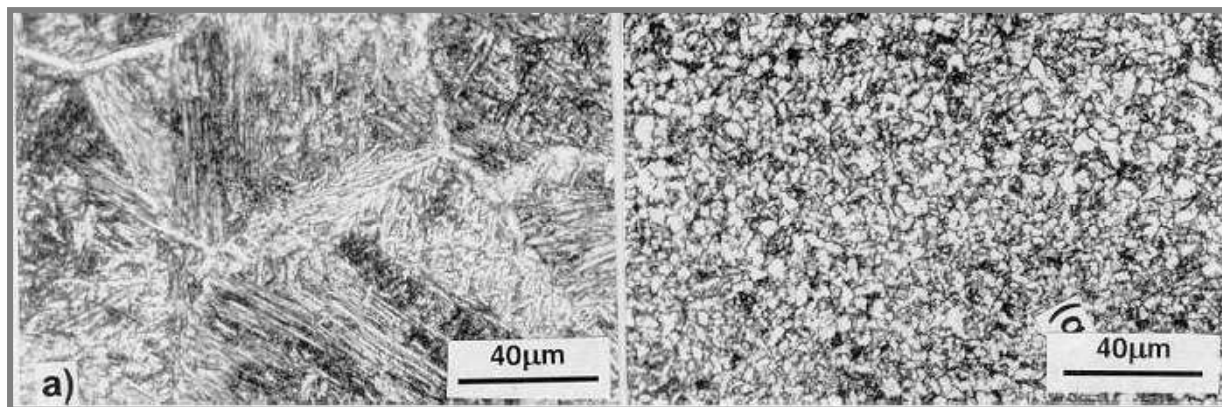
Rezultati daljih istraživanja problema prslina u zavarenim spojevima sfernih rezervoara su dati u radovima K. Gerić i S. Sedmaka [7, 8]. U ovim istraživanjima je ispitivanjem simuliranih uzoraka i uzoraka iz zavarenih spojeva pokazano da svojstva žilavosti zone uticaja toplote (ZUT) čelika NIOVAL 47, od koga su sfere izrađene, naglo opadaju u okolini linije stapanja. To je područje pri zavarivanju izloženo temperaturi iznad $1100^{\circ}C$, pa dolazi do pojave grubozrne strukture, karakteristične po krtosti. Nalazi ovih ispitivanja su omogućili razumevanje ponašanja zavarenih spojeva na sfernim rezervoarima u toku eksploatacije, ali i tokom ispitivanja probnim pritiskom. Objašnjenje ovakvog ponašanja ilustruju slike 8 i 9 [8].



Slika 7: Uzorak tipa "čamčić" isečen za metalografska ispitivanja, sa prslinom na dnu, koja se završava porom



Slika 8: Shema zone uticaja toplote posle četiri prolaza pri zavarivanju (I do IV), GZ – grubozrna zona; FZ – finoizrna zona; FGZ – grubozrna zona ponovo zagrevana iznad A_3 , a ispod 1200°C ; IGZ - grubozrna zona ponovo zagrevana interkritično, između A_1 i A_3 (iznad 700°C , a ispod 850°C)



Slika 9: Mikrostruktura grube zone (GZ) u ZUT (a) i finoizrne zone (FZ) (b), presek A-A na slici 8.

Visok nivo zahteva u izdavanju časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije" se uspešno održava sve vreme od kada izlazi pod tim naslovom. Kvalitet radova, učešće stranih autora i redovno izlaženje to potvrđuju. Da su ispunjeni kriterijumi kvaliteta svedoči i sve veći broj oglasa u časopisu, čime se stvara solidna materijalna baza za njegovo izlaženje.

Međutim, situacija nije bila takva 1989. godine. Posle niza godina sve manjeg interesa članova za rad u udruženjima zavarivača, rad DUZS je praktično zamro. Podrška industrije je gotovo potpuno izostala, a samo je neznatan broj entuzijasta prisustvovao godišnjim skupštinama 1989. i 1990, što se odrazilo u velikoj meri i na rad časopisa. Usvajanjem novog Statuta DUZS 11.10.1990. i izborom novog predsedništva od 7 članova sa R. Milićevićem na čelu, obnovljen je rad DUZS i data značajna podrška daljem izdavanju časopisa, koji je predstavljao u tom trenutku jedinu aktivnost. S obzirom na nezainteresovanost industrije da dalje pomaže rad DUZS, novi Statut je predvideo da se pređe na individualno učlanjenje i plaćanje članarine. Posle Godišnje skupštine časopis je počeo da objavljuje spisak članova koji su izmirili članarinu. Na dan 3.12.1990. broj upisanih članova prema uslovima novog statuta je bio 23 ("Zavarivač", 3-4/1990, str. 145), i sa tim brojem je praktično obnovljen DUZS. Kakav je odnos prema DUZS bio, govori i činjenica da je od 7 izabranih članova Predsedništva samo 3 obnovilo članstvo, dok 4 člana nisu našla za shodno da to urade ni do



dana objavljivanja spiska. Nije teško zamisliti nedoumicu u kojoj se našla redakcija kada je trebalo doneti odluku da se nastavi sa izdavanjem časopisa i za tako mali broj članova. Preovladala je optimistička prognoza da je to stanje trenutno, i da pored svih teškoća, treba očuvati časopis. Može se čak reći da je postojanje i redovno izlaženje časopisa sve više privlačilo nove članove, što je obezbedilo i opstanak DUZS. Podaci o broju članova, redovno objavljivani u časopisu, pokazuju da je na kraju 1992. godine DUZS brojao 103 člana, 1993–119, 1994–214, 1995–270, 1996–328, 1997–367, 1999–419 i 2000–436. Iako disciplina članova u pogledu izmirenja članarine nije bila zadovoljavajuća, ipak sam broj ukazuje na stabilizaciju i razvoj DUZS. Ovo se može oceniti kao izuzetan uspeh u okolnostima koje su pratile naš život i naše aktivnosti.

Ovo je bio samo jedan aspekt aktivnosti časopisa u periodu od 1989. Treba istaći još neke značajne aktivnosti. Članovi redakcije časopisa su, kao najaktivniji članovi DUZS, pokretali inicijativu za organizaciju stručnih skupova i konferencija. Zapažen je bio napor da se prate svetski trendovi u kompjuterizaciji u zavarivanju i podsticanje razvoju prikladnih programa, što je doprinelo organizaciji nekoliko skupova iz te oblasti i većem broju objavljenih radova u časopisu. Posebno uspešnim se mogu smatrati Međunarodna konferencija 1994. godine u Novom Sadu, zajedno sa izložbom zavarivanja, i skup posvećen obezbeđenju kvaliteta i promociji Zbirke standarda 1996.

Problemi integriteta konstrukcija i prslina u zavarenim konstrukcijama privlače sve veću pažnju autora, pa se pojavljuje veliki broj članaka posvećen tom problemu, koji ostaje permanentno prisutan u projektovanju, izradi i eksploataciji. Velik je broj radova posvećenih tom problemu u periodu 2001. do 2004, kako u časopisu "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", tako i u časopisu „Integritet i vek konstrukcija“, koji se pojavio 2001. potvrđuje izuzetan interes u istraživanju i eksploataciji zavarenih konstrukcija u pogledu njihovog ponašanja, integriteta i veka [9-17].

Još mnogo reči bi moglo da se posveti razvoju časopisa "Zavarivač" i "Zavarivanje i zavarene konstrukcije". Zadovoljimo se konstatacijom da je to danas značajan časopis u pogledu tematike koju obrađuje, sa radovima visokog nivoa domaćih i stranih autora, sa tehničkom opremom na evropskom nivou i sa značajnim priložima svih zainteresovanih za zavarivanje, što mu i omogućava neophodnu materijalnu podlogu. Takav časopis služi na čast i korist Društvu za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), svakom njegovom članu pojedinačno, kao i širokoj stručnoj javnosti.

LITERATURA

- [1] Lj. Vlajić, D. Drenić: "Delo prof. Milana Radojkovića, dipl. Inž. građevine", "Zavarivač", Vol. 39, 1/1994, str. 7-18.
- [2] W. S. Pellini: "Guidelines for fracture-safe and fatigue-reliable design of steel structures", The Welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AL, England, 1983
- [3] Hrivnjak: "Oštećenje i reparatura velikih sfernih rezervoara za tečne ugljovodonične gasove", "Zavarivač", Vol 35, 3-4/1990, str. 119 – 130.
- [4] Milosavljević, S. Đorđević, R. Prokić, M. Zrilić: "Primena magnetne metode za merenje zaostalih napona na zavarenom loptastom rezervoaru za tečni amonijak", , Vol. 36, 1/1991, str. 11 – 14.
- [5] J. Kurai, A. Fertilio: "Prilog problematici ispitivanja i ocen stanja sfernih rezervoara u eksploataciji", "Zavarivač", Vol. 38, 1/1993, str. 43 -50.
- [6] B. Aleksić, A. Fertilio: "Sanacija prslina u zoni zavarenog spoja na sfernim rezervoarima od finozrnih konstrukcijskih čelika", "Zavarivač", Vol. 38, 2/1993, str. 61 – 64.
- [7] K. Gerić, S. Sedmak: "Eksperimentalna analiza svojstava i otpornost prema prslinama zone uticaja toplote", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", Vol. 42, 1/1997, str. 31-41.
- [8] K. Gerić, S. Sedmak: "Otpornost prema prslinama zone uticaja toplote mikrolegiranih čelika", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", Vol. 45, 2/2000, str. 59 - 62.
- [9] Bređan, J. Kurai: "Tehnički nadzor nad opremom u eksploataciji", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", Vol. 46, 1-2/2001, str. 25 - 27.
- [10] Sedmak, H. A. Anyiam: "Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije", "Integritet i vek konstrukcija", 2/2001, str. 67-74.
- [11] P. Agatonović: "Različite strategije određivanja preostale čvrstoće i veka", "Integritet i vek konstrukcija", 2/2001, str. 75-90.
- [12] T. Adžiev, A. Sedmak, G. Adžiev, M. Arsić: "Ocena preostale čvrstoće zavarenog sfernog rezervoara sa prslinom", "Integritet i vek konstrukcija", 1-2/2002, str. 20-22.
- [13] Sedmak: "Procena integriteta zavarenih spojeva primenom inženjerskih metoda", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", Vol. 47, 4/2002, str. 213 - 218.
- [14] J. Kurai, B. Aleksić: "Ispitivanje pritiskom kao uzročnik pojave prslina kod opreme pod pritiskom u eksploataciji", "Integritet i vek konstrukcija", 2/2003, str. 65-72.
- [15] G. Adžiev, A. Sedmak: "Ocena integriteta sfernog rezervoara", "Integritet i vek konstrukcija", 2/2003, str. 93-98.
- [16] Sedmak, M. Berković, N. Savović: "Numerical Analysis of Surface Crack Problems in Pressure Vessels", "Integritet i vek konstrukcija", 2/04, str. 91-100.
- [17] S. Cvetkovski, V. Grabulov, D. Slavkov, J. Magdeski: "Karakteristike zavarenog spoja mikrolegiranog čelika u zavisnosti od parametara zavarivanja i termičke obrade nakon zavarivanja", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", Vol. 49, 2/2004, str. 53 - 60.



Mirjana Smiljanić

Glavna i odgovorna urednica časopisa od 2001 – 2004. godine

Reprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije, broj 4, 2006. godina, str. 155 - 164.

M. Smiljanić

ZAVARLJIVI FINOZRNI ČELICI
SPOSOBNOST ZAVARIVANJA I ZAVARIVANJE
WELDABLE FINE GRAIN STRUCTURAL STEELS
WELDING AND WELDABILITY

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC: 621.791:669.018.29-194.2

Rad primljen / Paper received:

Mart 2006.

Ključne reči: Finozrni čelici, sposobnost zavarivanja, elektrolučno zavarivanje, ZUT, predgrevanje, $t_{8/5}$, termička obrada posle zavarivanja, JUS EN standardi.

Izvod

JUS EN tehnička regulativa obogaćena je grupom standarda za metalurške proizvode od finozrnih konstrukcionih čelika (JUS EN 10113) i čelika za posude pod pritiskom grupom (JUS EN 10028). Primena ovih modernih čelika je značajan faktor za povećanje ekonomičnosti proizvodnje i kvaliteta izrade zavarenih čeličnih konstrukcija i posuda pod pritiskom. U toku je i donošenje standarda JUS EN 1011-2 koji sadrži preporuke za elektrolučno zavarivanje feritnih čelika, uključujući i finozrne čelike.

U radu se razmatra sposobnost zavarivanja finozrnih čelika i zavarivanje, u meri koja je potrebna za razumevanje rešenja datih u standardima za proizvode, i posebno u standardu preporuka za zavarivanje.

Adresa autora / Author's address:

Mirjana Smiljanić, dipl. ing.

e-mail: mms2@ptt.yu

Keywords: Fine grain steels, weldability, arc welding, HAZ, preheating, $t_{8/5}$, post weld heat treatment, JUS EN standards.

Abstract

Technical regulation of JUS now comprises standards for weldable fine grain structural steels, group JUS EN 10113 and steels for pressure vessels, group JUS EN 10028. The application of these modern steels is the important factor for economical production improvement and steel construction and pressure vessels manufacturing quality. Also, the standard JUS EN 1011-2 is preparing, and it comprises recommendations for arc welding of ferritic steels, including fine grain steels.

In this paper, weldability of fine grain steels and welding are considered, in quantity which is necessary for better understanding of solutions given in mentioned standards and specially in welding recommendations.

UVOD

Zajednička karakteristika finozrnih konstrukcionih čelika je nizak % C i legirajućih elemenata (mikrolegiranje i niskolegiranje), visok stepen čistoće (nizak % P i S) i sitnozrna struktura, što ukupno obezbeđuje dobru žilavost i kod povećanih i visokih vrednosti mehaničkih osobina. U vezi sa ovim karakteristikama je dobra sposobnost zavarivanja. Pod pojmom finozrni čelik podrazumeva se čelik sa veličinom feritnog zrna \leq od 6 (metoda određivanja prema EU 103).

Označavanje finozrnih čelika

U oznaci stanja isporuke metalurških proizvoda finozrnih čelika, a koja ukazuje na način dobijanja sitnog feritnog zrna procesom valjanja, razlikuju se dve oznake: oznaka N - za normalizaciono žareno i normalizaciono valjano stanje, i oznaka M - za termomehanički valjano stanje.

Normalizaciono žareno stanje je postupak konvencionalnog valjanja sa naknadnom termičkom obradom za usitnjenje zrna normalizacionim žarenjem.

Normalizaciono valjanje je postupak toplog valjanja finozrnih (mikrolegiranih) čelika u kome se predvaljanje i završno valjanje izvode u austenitnoj oblasti u kojoj je rekristalizacija potpuna, a hlađenje do sobne temperature se vrši na vazduhu-normalizacijom. Završna struktura se dobija otpuštanjem.

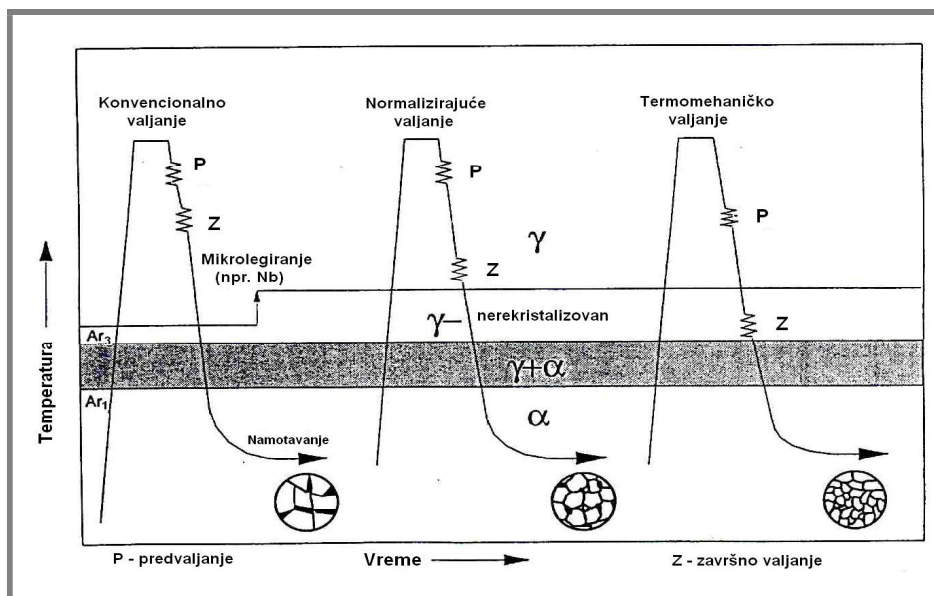
Termomehaničko valjanje je postupak toplog valjanja finozrnih (mikrolegiranih) čelika u kome se predvaljanje izvodi u austenitnoj oblasti u kojoj je rekristalizacija potpuna, a završno valjanje u oblasti u kojoj je rekristalizacija sprečena. Nakon završnog valjanja toplovaljana traka se hladi vodom do temperatura na kojima je završena transformacija austenita u ferit (slika 1) [1-4].



Za termičko stanje N valjanih metalurških proizvoda koje ukazuje na način dobijanja strukturnih i mehaničkih osobina u procesu fazne transformacije oznake su: Q - ubrzano hlađenje; QT - hlađenje vodom (kaljenje) + otpuštanje, a kod M valjanih metalurških proizvoda otvrdnutih taloženjem oznaka je A.

Prema nameni podeljeni su u čelike za noseće čelične konstrukcije, oznake S, ili za posude pod pritiskom,

oznake P. Osnovna oznaka vrste čelika je minimalna vrednost napona tečenja, odnosno, kod čelika visoke čvrstoće, 0,2% granica izduženja. Dodatne oznake se odnose na osobine za namenu na niskim (L) i povišenim (H) temperaturama i druge oznake značajne za primenu.



Slika 1: Šema procesa konvencionalnog, normalizacionog i termomehaničkog valjanja [4]

Podela finoznih čelika

Osnovne grupe finoznih čelika su:

1. Normalizaciono žareni i/ili normalizaciono valjani (mikrolegirani) finozni čelici oznake N, napona tečenja od 255 do 500 N/mm²,
2. Kaljeni i otpušteni (mikrolegirani) finozni čelici, oznake Q (QT), napona tečenja do 950 (1000) N/mm²,
3. Termomehanički valjani (mikrolegirani) finozni čelici, oznake M, napona tečenja do 700 N/mm², i otvrdnuti taloženjem, oznake A [1].

Kod finoznih čelika za noseće čelične konstrukcije (S) N stanja, pored vrednosti mehaničkih osobina, važna konstruktivna karakteristika je i najmanja vrednost žilavosti na okolnoj i sniženim temperaturama data kao dodatna oznaka. Čelici sa naponom tečenja preko 500 N/mm² proizvode se kaljenjem i otpuštanjem. Pri završetku valjanja poluproizvod zagrejan na temperaturi kaljenja hladi se obično vodom, a zatim sledi otpuštanje na oko 600°C.

U stanju isporuke QT (hlađenje vodom + otpuštanje) su povišenog i visokog napona tečenja (S 460 - S 960) i visoke žilavosti, namenjeni za konstrukcije visokih opterećenja i niže radne temperature. Za obezbeđenje martenzitne transformacije po celom preseku, naročito kod većih debljina neophodno je legiranje [4].

Zbog toga je kod ovih čelika dopušten porast sadržaja Cr do max. 1,5% i Mo do 0,7%. Dodatno legiranje sa Cr

je i u nameni za povećanje otpornosti na habanje (građevinske mašine) za povećanje Re do preko 900 N/mm², ili HV 400-600.

Kod finoznih čelika za posude pod pritiskom (P) namenjenih za povišene radne temperature stanje isporuke je Q (hlađenje na vazduhu + otpuštanje), a za snižene radne temperature, za sniženje prelazne temperature žilavosti, je QT (hlađenje vodom + otpuštanje).

Alternativa termičkoj obradi otpuštanja su čelici termomehanički valjani (M) i intenzivno hlađeni, Re od 355 - 700 (800) N/mm², niske vrednosti ugljeničnog ekvivalenta (cevi velikih debljina zida, teška vozila) i M A čelici otvrdnuti taloženjem [1,4]. Termomehaničkim valjanjem, sa modifikacijama temperaturnog područja završetka valjanja i kontrolisanog ubrzanog hlađenja, omogućeno je dalje smanjenje feritnog zrna i otvrdnjavanje taloženjem u feritu, čime su dobijeni čelici visokog napona tečenja, dobre žilavosti i niske prelazne temperature, dobre otpornosti na naponsku koroziju, sa ravnomernim osobinama po preseku debljine i dobre sposobnosti za zavarivanje. Cilj ove tehnologije valjanja je bio da se izbegne naknadno otpuštanje, tj. da se eliminišu troškovi naknadnog zagrevanja i potrebe za većim sadržajem legirajućih elemenata i omogući masovna proizvodnja sa sniženim troškovima [2]. Struktura toplovaljane trake se ne može ostvariti naknadnom termičkom obradom.



SPOSOBNOST ZAVARIVANJA FINOZRNIH N ČELIKA

Kod zavarivanja su mogući sledeći rizici:

1. Nastanak hladnih prslina izazvanih vodonikom u metalu šava i u osnovnom materijalu, u zoni koja je pod uticajem toplote usled zavarivanja (ZUT) i prslina usled zakaljivanja u ZUT;
2. Sniženje žilavosti i povećanje prelazne temperature krtosti usled nastanka grubog zrna, zakaljivanja ili izlučivanja u ZUT;
3. Sniženje čvrstoće u široj zoni ZUT usled otpuštanja, kod čelika kaljenog i otpuštenog stanja [3].

Uzroci i sprečavanje hladnih prslina

Zakaljivanje

Porastom udela martenzita usled zakaljivanja u ZUT opada sposobnost deformisanja, što dovodi do hladnih prslina. Iako odnos martenzita i porasta tvrdoće nije jednak za sve vrste čelika, ipak, zbog jednostavnosti određivanja, vrednost tvrdoće je praktično merilo stepena zakaljivanja. Uopšteno uzevši, za sprečavanje pojave hladnih prslina gornju vrednost tvrdoće od 350 (360) HV ne treba prekoračiti.

S obzirom da kod finoizrni čelika međusobni odnos vrednosti tvrdoće i sposobnosti deformisanja nije dovoljno jasan, u pravilima za izradu zavarenih konstrukcija dopuštene su i veće vrednosti tvrdoće, ako se ispitivanjem dokaže odgovarajuća vrednost žilavosti.

Kod čelika N stanja zakaljivanje se može smanjiti primenom predgrevanja i povišenom pogonskom energijom zavarivanja. Takođe, u znatnom stepenu zakaljivanje se može smanjiti tehnikom polaganja pravih tankih preklopljenih zavara. Otpuštanje ZUT prethodno nanetog zavara moguće je polaganjem dodatnih tehnoloških zavara koji preklapaju zavare temena šava sa osnovnim materijalom, polaganjem dodatnog sloja ili pretapanjem završnog sloja temena šava postupkom TIG [5]. Termička obrada otpuštanja /žarenja za smanjenje napona posle zavarivanja je prihvatljiva, uz određena ograničenja kod tipova čelika koji su skloni pojavi prslina usled ponovnog zagrevanja.

Kod kaljenih i otpuštenih (Q) čelika, za sprečavanje zakaljivanja i obezbeđenje prihvatljive vrednosti tvrdoće u ZUT neophodan je kontrolisani termički ciklus zavarivanja, odnosno određeno vreme hlađenja u temperaturnom području od 800 do 500°C. Primena termičke obrade otpuštanja/žarenja za smanjenje napona posle zavarivanja moguća je u meri koja neće izmeniti koncept osnovne strukture u široj zoni ZUT [3, 4].

Vodonikom izazvane prsline

Vodonik u metalu šava, unet preko potrošnog materijala i okolne atmosfere, difunduje iz metala šava u ZUT, i znatno smanjuje deformabilnost martenzita

nastalog usled zakaljivanja te povećava sklonost nastajanju hladnih prslina, posebno kod N finoizrni čelika min. $Re \geq 460 \text{ N/mm}^2$, i vodom hlađenih Q čelika. U metalu šava, u uslovima povišenog naponskog stanja (uklješteni spojevi, velike debljine šava, legiran metal šava), hladne prsline su izazvane vodonikom [3, 4].

Za sprečavanje nastanka hladnih prslina usled prisustva vodonika koriste se potrošni materijali određenog niskog sadržaja vodonika, a zavisno od sklonosti čelika zakaljivanju primenjuje se predgrevanje i/ili povišena pogonska energija zavarivanja. Smanjenje količine vodonika moguće je primenom ponovo sušenih i zagrejanih bazičnih elektroda, odnosno praška (kod EPP), i obezbeđenjem čistoće područja šava (žljeb i okolina).

Kod čelika povišene osetljivosti na hladne prsline, pre svega kod EPP zavarivanja čelika $Re \geq 460 \text{ N/mm}^2$, debljina $> 30\text{mm}$, neposredno posle završetka zavarivanja preporučuje se primena žarenja za smanjenje vodonika na temperaturi 200-280°C u trajanju najmanje 2 časa. Kod kontrolisanog hlađenja, u niskotemperaturnom delu termičkog ciklusa, to je vreme hlađenja od 300 do 100°C u vremenu od 1 čas ($t_{3/1}$). Ova operacija je moguća i kao dogrevanje na temperaturu do ispod 300°C, pre nego što međuslojna temperatura T_i padne ispod 100°C; temperatura i vreme držanja zavise od debljine šava [3, 4].

Detaljne preporuke za sprečavanje pojave hladnih prslina usled prisustva vodonika date su u literaturi [5].

Uzroci sniženja žilavosti i sprečavanje

Porast zrna u uskoj zoni ZUT

Iako su finoizrni čelici manje skloni porastu zrna (tek u temperaturnom području iznad 1000°C), u uskoj zoni ZUT sa porastom zrna smanjuje se žilavost i povećava prelazna temperatura krtosti. Širina grubozrne zone može se smanjiti sniženjem pogonske energije i temperature predgrevanja. U izvesnoj meri, kod višeslojnih spojeva grubo zrno se može izbeći normalizacionim efektom narednih slojeva, nanetih tehnikom polaganja pravih tankih zavara.

Izlučivanja

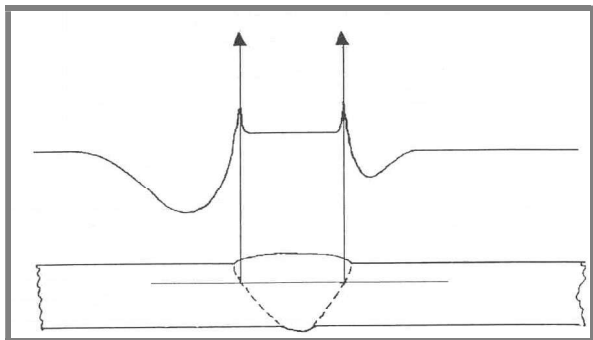
Izlučivanjem karbida i karbonitrida mikrolegirajućih elemenata V, Ti, Nb načelno dolazi do porasta $R_{p0.2}$ i R_m , ali istovremeno i smanjenja žilavosti i porasta prelazne temperature krtosti. Uticaj na žilavost i prelaznu temperaturu zavisi od vrste, oblika, veličine i raspodele izlučivanja. Pri tome, određen uticaj ima i to da li su izlučivanja nastala otpuštanjem martenzita, gornjeg beinita, donjeg beinita ili ferita. Veći je negativan uticaj izlučivanja ako nastaju iz gornjeg beinita, a manji ako nastaju iz martenzita i donjeg beinita [3]. Dobijanju najpovoljnijih struktura za smanjen uticaj izlučivanja na žilavost pogoduje smanjenje pogonske energije zavarivanja i sniženje temperature predgrevanja.



Sniženje čvrstoće u široj zoni ZUT usled otpuštanja

Kod zavarivanja QT čelika, naročito čelika visokog napona tečenja, mogu da nastanu dva suprotstavljena problema. Zbog povišene legiranosti, povećana sklonost ka zakaljivanju u ZUT zahteva pri zavarivanju veći unos toplote, odnosno povećanje vremena hlađenja $t_{8/5}$, zbog čega može da nastane preterano otpuštanje i pad čvrstoće u odnosu na polazno stanje.

U ZUT nastaje karakterističan profil tvrdoće (slika 2), špic tvrdoće i oštar pad tvrdoće [3, 4].



Slika 2: Šema profila tvrdoće zavarenog spoja vodom hlađenih i otpuštenih (QT) čelika [4]

Opšta saznanja su da je povišen unos toplote opasniji od nešto povišenog špica tvrdoće. Dozvoljena maksimalna vrednost HV još nije jedinstveno regulisana. Primena termičke obrade žarenja za smanjenje napona nije preporučljiva, zbog povećane opasnosti od pada čvrstoće. Pri proveru zavarivača za postupak E svedočanstvo mora da sadrži elemente koji određuju unos toplote (brzina zavarivanja preko dužine zavara).

SPOSOBNOST ZAVARIVANJA M ČELIKA

Kod zavarivanja M čelika, u ZUT neposredno uz liniju stapanja, zavisno od količine unete toplote, nastaje nepovratno narušavanje obrade termomehaničkog stanja za finoću zrna, sniženje žilavosti, i u široj zoni omekšavanje usled narušavanja termičkog ciklusa ubrzanog hlađenja ili taložnog otvrdnjavanja. Iz tih razloga pri zavarivanju je neophodno održavanje ograničenja količine unete toplote i vremena hlađenja $t_{8/5}$, i ograničenje primene i uslova termičke obrade posle zavarivanja / žarenja za smanjenje napona.

Sklonost zakaljivanju

U odnosu na N čelike, zbog niskog sadržaja ugljenika, sklonost zakaljivanju u ZUT je veoma smanjena. I kada je prisutan martenzit, zbog niže tvrdoće i nižih naponskih stanja niskougljeničnog martenzita, pojava hladnih prslina usled zakaljivanja je mala. Kod M čelika, prevashodno zbog sniženja ugljeničnog ekvivalenta, potrebna temperatura predgrevanja je približno za 100°C niža u odnosu na N čelike iste klase [4].

Vodonikom izazvane prsline

Fazna transformacija austenita u ferit u ZUT, zbog niskog sadržaja ugljenika M čelika, je na višim temperaturama u odnosu na metal šava. Zato je difuzija vodonika iz metala šava u ZUT smanjena, te je smanjeno i rastvaranje vodonika u ZUT.

Zbog toga, kod M čelika prsline češće mogu da budu u metalu šava nego kod N čelika. Iz tih razloga, kod određivanja primene predgrevanja i temperature predgrevanja bolje je uzeti u obzir ekvivalent ugljenika metala šava nego osnovnog materijala [3-5].

Žilavost u ZUT

Mikrostruktura ZUT zavisi od hemijskog sastava (ugljenični ekvivalent) i količine unete toplote, te je žilavost u skladu sa nastalom mikrostrukturom.

Kod jednoslojnog zavarenog spoja, pri malim količinama unete toplote pri zavarivanju i za odgovarajuće kratka vremena hlađenja $t_{8/5}$, mikrostruktura se sastoji od donjeg beinita zadovoljavajuće vrednosti žilavosti. Pri zavarivanju sa velikim unosom toplote nastaje grubozrna ZUT, i mikrostruktura se sastoji od gornjeg beinita, ostrvaca martenzita i feritnih pločica po granicama zrna.

Ovakve mikrostrukture dovode do manje ili veće degradacije žilavosti, zavisno od veličine ugljeničnog ekvivalenta. Ponekad su začeci ferita unutar zrna, i tada nastaju tzv intragranularni feriti - poligonalni i igličasti (acikularni). Nukleacija acikularnog ferita se odlikuje rafiniranim zrnima, tako da se zadržava dobra žilavost. Mesta nukleacije acikularnog ferita su uključici, npr. Ti oksida, koji sprečavaju i ogrubljenje zrna, na kom principu su razvijeni čelici koji se mogu zavarivati sa većim unosom toplote uz očuvanje žilavosti [3].

Kod višeslojno zavarenog spoja izvedenog sa velikim unosom toplote mikrostruktura ZUT zavisi od termičkog uticaja narednog sloja, odnosno od vršne temperature u ZUT (iznad Ac_3 , između Ac_1 i Ac_3 , ispod Ac_1) postignute termičkim uticajem narednog sloja. Tako rezultat transformacije može da bude mikrostruktura gornjeg beinita, martenzita, intragranularnog ferita i ređe donjeg beinita.

Shodno dobijenoj mikrostrukтури, vrednosti žilavosti u ZUT variraju i moguća je pojava lokalne krтости usled prisustva martenzita. Smanjenje udela martenzita, odnosno njegovo raspadanje, moguće je ponovnim zagrevanjem ispod Ac_1 , odgovarajućim polaganjem zavara sa efektima žarenja, odnosno otpuštanja [3, 4]. Nukleacijom acikularnog ferita (čelici sa uključcima Ti oksida) obezbeđuje se odgovarajuća žilavost u ZUT višeslojnog šava, jer se tada njihov ZUT uglavnom sastoji od finog acikularnog ferita [3].

Omekšavanje ZUT

Velika količina unete toplote, karakteristična za EPP zavarivanje može dovesti do omekšavanja ZUT.



Istraživanja na čeliku od $R_m 490 \text{ N/mm}^2$ za čelične konstrukcije, zavarivanim sa izuzetno velikim unosom toplote (EPP sa tri žice), pokazuju da je širina omekšane zone približna debljini lima, a vrednost čvrstoće je 90% vrednosti osnovnog materijala, te se smatra da omekšavanje ZUT nema bitan uticaj na čvrstoću pri savijanju zavarene konstrukcije [3].

U stavovima da je za zavaren spoj važna čvrstoća metala šava, primenjuje se dodatni materijal nešto veće čvrstoće čistog metala šava u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala. Druga rešenja su vezana za izbor osnovnog materijala sa dodatkom Nb, zbog njegove uloge u taložnom otvrdnjavanju tokom hlađenja zavarenog spoja [3].

Čelici otvrdnuti taloženjem pri zavarivanju zahtevaju nižu pogonsku energiju kako u ZUT ne bi nastalo preterano rastvaranje i pad čvrstoće.

ZAVARIVANJE FINOZRNIH ČELIKA

Finozrni čelici se zavaruju svim elektrolučnim postupcima. U odnosu na ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom prednost je MAG/MAGM i EPP postupak, zbog jednostavnijeg upravljanja procesom kontrolisanja količine unete toplote preko brzine zavarivanja.

Tehnološka rešenja za zavarivanje usmerena su na:

- sprečavanje nastanka hladnih prslina i
- određivanje uslova zavarivanja za dobijanje zahtevanih osobina (tvrdoće i žilavosti) ZUT koje obezbeđuju sigurnost zavarenog spoja u eksploataciji.

Tehnološka rešenja zavise od:

- vrste čelika: primenjenog postupka valjanja (N ili M), hemijskog sastava (uključujući i mikrolegiranje), primenjenog postupka hlađenja i otpuštanja po završetku valjanja;
- mehaničko-tehnoloških osobina čelika i zahteva za mehaničko-tehnološke osobine ZUT zavarenog spoja.

Detaljne preporuke za zavarivanje u pr. JUS EN 1011-2:2005 posebno razmatraju određivanje temperature predgrevanja i termičkog ciklusa vremena hlađenja $t_{8/5}$.

Izbor dodatnog materijala kod N čelika

Izbor dodatnog materijala za zavarivanje se bazira na vrednostima čvrstoće osnovnog materijala i njegovoj osetljivosti za nastanak hladnih prslina izazvanih vodonikom iz metala šava. Sa aspekta sadržaja vodonika, kod čelika povišene čvrstoće preporuke su za primenu dodatnog materijala sa nižim, a kod čelika visoke čvrstoće sa niskim sadržajem difundovanog vodonika. Takođe, kod većeg mešanja osnovnog i dodatnog materijala, kao što je to kod korenih zavara sučeonog spoja, preporučuje se primena dodatnog materijala nižeg, odnosno niskog sadržaja difundovanog vodonika, zavisno od sklonosti osnovnog materijala zakaljivanju.

U izboru dodatnog materijala u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala mogući su sledeći pristupi:

- da čist metal šava ima vrednost čvrstoće u granicama osnovnog materijala;
- da čist metal šava ima nižu vrednost čvrstoće od osnovnog materijala ("undermatching"),
- da čist metal šava ima veću vrednost čvrstoće od osnovnog materijala ("overmatching").

Kod čelika napona tečenja do 500 N/mm^2 izbor dodatnog materijala je u saglasnosti sa osobinama osnovnog materijala. Kod čelika $\min R_e \geq 460 \text{ N/mm}^2$ za korene zavare povoljna je primena dodatnog materijala nižih osobina u odnosu na osnovni materijal i dodatni materijal zavara ispune. Ovaj pristup se primenjuje i kod ugaonih spojeva, posebno ako je čelik sklon lamelarnom lomu.

Kod čelika napona tečenja većeg od 500 N/mm^2 primenom dodatnog materijala manje čvrstoće postiže se veća deformabilnost metala šava, te je manja osetljivost i na naponske prsline.

Kod zavarivanja čelika koji omekšavaju u ZUT (ubrzano hlađeni, kaljeni i otpušteni; EPP zavarivanje) zastupljeni su pristupi povećanju čvrstoće zavarenog spoja primenom dodatnog materijala veće čvrstoće od osnovnog materijala.

Izvestan manji stepen ojačanja metala šava sa aspekta mehanike loma je povoljan. U tom slučaju kod izbora temperature predgrevanja uzima se u obzir ugljenični ekvivalent metala šava [4-6].

Izbor dodatnog materijala kod M čelika

Sadržaj vodonika u metalu šava

Manja sklonost zakaljivanju M čelika i niža tvrdoća martenzita čelika niskog ugljeničnog ekvivalenta, daju mogućnost primene i dodatnog materijala sa povišenim sadržajem difundovanog vodonika, bez opasnosti od pojave hladnih prslina. Takav je slučaj u primeni visokovodoničnih elektroda za velike brzine zavarivanja u horizontalnom položaju jednoslojnih konkavnih ugaonih spojeva, ili primena celuloznih elektroda kod zavarivanja cevi za transport gasa, od čelika veoma niskog sadržaja ugljenika [3].

Kod suviše male količine unete toplote mogućnost primene dodatnog materijala sa povišenim sadržajem difundovanog vodonika je ograničena, zbog opasnosti od vodoničnih prslina u metalu šava.

Kod niskovodoničnog dodatnog materijala primena predgrevanja je uglavnom kod velike debljine.

Pojava vrućih prslina u metalu šava

Svi savremeni dodatni materijali za zavarivanje finozrni čelika su visokog stepena čistoće i niskog sadržaja ugljenika, te je sklonost pojavi vrućih prslina (prsline pri očvršćavanju) u principu mala. Međutim, metal šava sa izuzetno smanjenim sadržajem ugljenika je osetljiv na pojavu prslina pri očvršćavanju. Vruće



prslina mogu da se pojave kod zavarivanja korenog zavara celuloznim elektrodama u položaju vertikalno naniže, kao što je to kod izrade cevovoda od M čelika sa ultra niskim sadržajem ugljenika, koji su razvijeni za tu namenu. Iz tih razloga, primena dodatnog materijala sa sadržajem C < 0,03% nije preporučljiva [3, 4, 6].

Osobine metala šava

Mehaničko-tehnološke osobine M čelika su rezultat termomehantičkog valjanja i termičkog ciklusa hlađenja. Mehaničke osobine i žilavost metala šava obezbeđuju se samo hemijskim sastavom i uslovima zavarivanja. Povećanje mehaničkih osobina metala šava se zasniva na legiranju dodatnog materijala, i mikrolegiranju u cilju usitnjenja zrna za poboljšanje žilavosti.

Za sprečavanje izlučivanja pločastog ferita po granicama zrna i favorizovanje intragranularnog acikularnog ferita razvijeni su dodatni materijali sistema Ti-B, naročito za spojeve koji se izvode sa velikim unosom toplote.

Pri nižem ekvivalentu ugljenika metala šava mikrostruktura se uglavnom sastoji od gornjeg beinita i ferita izlučenog po granicama zrna, a kod visokog ekvivalenta ugljenika metala šava mikrostruktura je gornjeg beinita, takođe snižene žilavosti. Kod optimalnih vrednosti ekvivalenta ugljenika postignuto je povećanje čvrstoće (uticaj B) i žilavosti (uticaj Ti i B), kao rezultat nastanka mikrostrukture acikularnog ferita [3].

Predgrevanje

Predgrevanje i održavanje temperature predgrevanja u toku zavarivanja je mera za sprečavanje nastanka hladnih prslina usled zakaljivanja i vodonikom indukovanih prslina.

Primena predgrevanja i temperatura predgrevanja zavise od faktora:

- temperature okoline zavarivanja;
- ugljeničnog ekvivalenta,
- sadržaja vodonika u metalu šava;
- količine unete toplote pri zavarivanju, i
- debljine materijala, odnosno geometrije spoja.

Predgrevanje samo zbog niske temperature okoline (kada zbog ostalih razloga nije potrebno predgrevanje) preporučuje se za opšti slučaj ako je okolna temperatura ispod +5°C.

Za konkretnu vrstu konstrukcije preporuke su date u pravilima, zavisno od vrste materijala i konstrukcije.

Za određivanje temperature predgrevanja (T_p) zbog uticaja hemijskog sastava, izraženog veličinom ugljeničnog ekvivalenta, predložene su dve metode kod temperature okoline 0°C: metoda koja uzima u obzir veličinu ugljeničnog ekvivalenta po formuli CE% (IIW formula) i metoda u kojoj je ugljenični ekvivalent po formuli CET%.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

$$CET = C + Mn + \frac{Mo}{10} + Cr + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2)$$

Koja će formula da bude primenjena zavisi od opsega hemijskog sastava čelika (tabela 1) utvrđenog analizom topioničke šarže (sertifikat isporuke), ili date gornje nominalne vrednosti u standardu za vrstu čelika [6].

Tabela 1. Primena formule za ugljenični ekvivalent za opseg hemijskog sastava osnovnog materijala (tež. %)

Uglj. ekv.	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V	Nb	Ti	B
CE	0,05- 0,25	max. 0,8	max. 1,7	max. 0,9	max. 1,0	max. 2,5	max. 0,75	max. 0,2	-	-	-
CET	0,05- 0,32	max. 0,8	0,5-1,9	max. 1,5	max. 0,7	max. 2,5	max. 0,75	max. 0,18	max. 0,06	max. 0,12	max. 0,005

Uticajni faktori na minimalnu temperaturu predgrevanja (T_p) kod obe metode su:

- Hemijski sastav osnovnog materijal preko veličine vrednosti ugljeničnog ekvivalenta (CE ili CET%);
- Sadržaj vodonika, preko klase skale sadržaja difundovao vodonika (tabela 2) u metalu šava (H u ml/100g);
- Količina unete toplote (Q u kJ/mm);
- Debljina lima, odnosno kombinovana debljina spoja (d u mm).

Tabela 2: Skala sadržaja vodonika

Sadržaj difundovanog H ₂ u MŠ (mm/100g)	Klasa
>15	A
10≤15	B
5≤10	C
3≤5	D
≤3	E

Podaci za T_p se očitavaju iz dijagrama za određene veličine CE, odnosno CET, H i Q. Svaki dijagram za očitavanje T_p odnosi se na određene raspone CE, odnosno CET kojima odgovara primena dodatnog materijala određene klase sadržaja H.



Korišćenje ovih dijagrama uključuje i mogućnost određivanja one količine unete toplote kojom se izbegava predgrevanje (izbor količine unete toplote za $T_p = 20^\circ\text{C}$) [6].

Termički ciklus zavarivanja

Na pojavu hladnih prslina i na mehaničko- tehnološke osobine zavarenog spoja značajan uticaj ima termički ciklus zavarivanja, odnosno vreme hlađenja (s) zavara i njegove ZUT u opsegu temperatura $800\text{--}500^\circ\text{C}$, $t_{8/5}$, u kojem se mogu stvoriti uslovi za pojavu beinitne i martenzitne strukture.

Veličina vreme hlađenja $t_{8/5}$ za određen čelik zavisi od uticajnih faktora:

- temperature predgrevanja,
- količine unete toplote pri zavarivanju i
- geometrije šava.

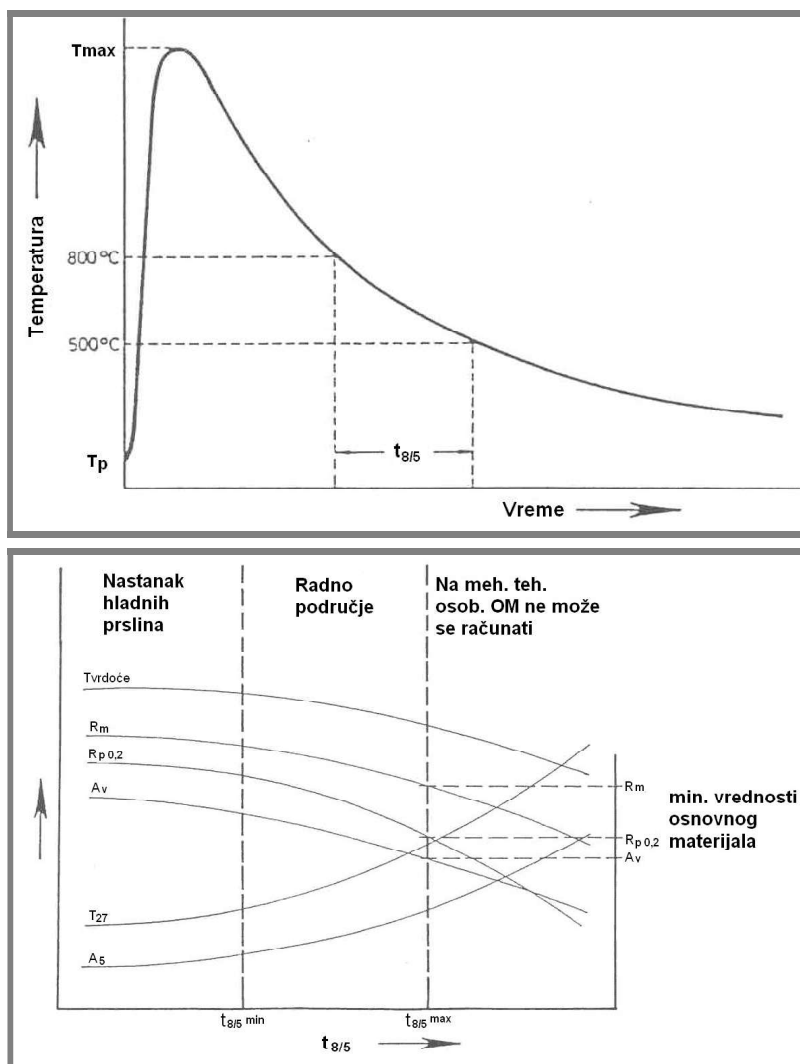
Povećanje vremena hlađenja $t_{8/5}$ uglavnom dovodi do smanjenja tvrdoće, smanjenja žilavosti i povećanja

prelazne temperature u ZUT, a smanjenje vremena hlađenja $t_{8/5}$ dovodi do smanjenja pokazatelja deformabilnosti i pojave hladnih prslina (slika 3). Iz toga sledi da je za dobijanje zavarenog spoja bez prslina i prihvatljivih mehaničko-tehnoloških osobina u odnosu na osobine osnovnog materijala, vreme $t_{8/5}$ ograničeno.

Za nelegirane čelike povišene čvrstoće i niskolegirane čelike odgovarajuće vreme hlađenja $t_{8/5}$ se nalazi u opsegu od $10\text{--}25\text{ s}$ [5, 6].

Za određeni čelik, u postavljenom zahtevu da se ne sme prekoračiti određena vrednost HV, $t_{8/5}$ mora da bude ograničeno gornjom vrednosti dozvoljene HV u ZUT (slika 4).

Takođe, uz ograničenje max. HV, sa zahtevom za dozvoljenu minimalnu vrednost žilavosti i maksimalnu prelaznu temperaturu žilavosti, povećanje $t_{8/5}$ je ograničeno (slike 5 i 6), odnosno, za konkretni čelik i postavljene zahteve za osobine zavarenog spoja opseg $t_{8/5}$ se sužava.



Slika 3: Termički ciklus zavarivanja i uticaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na osobine ZUT zavarenog spoja [4]

Za ovakav pristup, za odgovarajući čelik potrebno je poznavanje krive za tvrdoću, žilavost i prelaznu

temperaturu žilavosti u zavisnosti od $t_{8/5}$. Ove krive se konstruišu na osnovu merenja, ili izračunavanjem $t_{8/5}$,



sa proveravanjem dobijenih veličina ispitivanjem proba zavarivanja kao kod kvalifikacije tehnologije zavarivanja [5, 6].

Računsko određivanje $t_{8/5}$

Jednačine za računsko određivanje vremena hlađenja $t_{8/5}$ sadrže vrednosti fizičkih osobina (toplota provodljivost, specifična toplota, gustina) za područje nelegiranih i niskolegiranih konstrukcionih čelika, što nije bilo naznačeno u jednačini prema JUS C.T3.101.

Jednačina za proračun $t_{8/5}$ kod trodimenzionalnog odvođenja toplote:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad (3)$$

Jednačina za proračun kod dvodimenzionalnog odvođenja toplote:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad (4)$$

gde je:

$$Q = \varepsilon \times E$$

- T_0 – temperatura predgrevanja,
- ε – termička efikasnost postupka zavarivanja,
- E – J/mm, pogonska (linijska energija).

Temperatura predgrevanja T_0 se određuje iz odgovarajućih dijagrama [6] za dati čelik (vrednost CE ili CET), veličinu H i količinu unete toplote Q.

$$\text{-Za EPP, MAG zavarivanje } E = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (5)$$

gde je:

- U – napon luka u V;
- I – struja zavarivanja u A;
- v – brzina zavarivanja u mm/s.

$$\text{-Za ručno elektroručno zavarivanje, } E = \frac{U \cdot I \cdot t}{l \cdot 1000} \quad (6)$$

gde je:

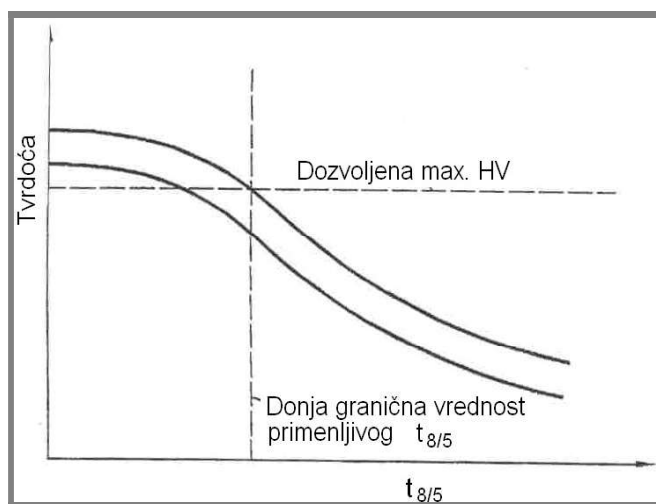
t – vreme topljenja elektrode sa ostatkom dužine od 50 mm,

l – dužina zavara (gusenice) u mm.

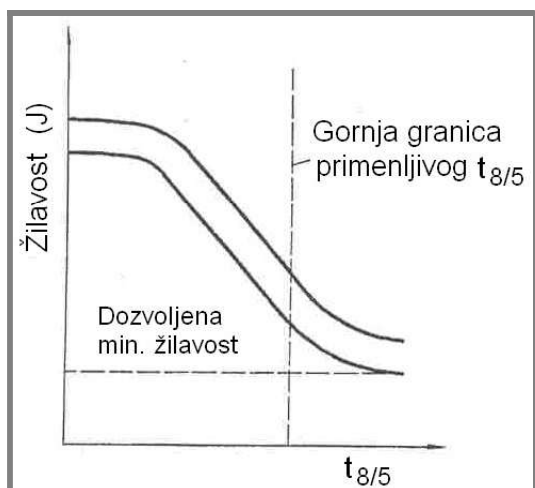
F_2 i F_3 su faktori uticaja vrste šava, d – debljina osnovnog materijala u mm. Kod šavova različitih debljina u spoju $d = d_m$:

$$\text{-Za sučeoni spoj } d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (7)$$

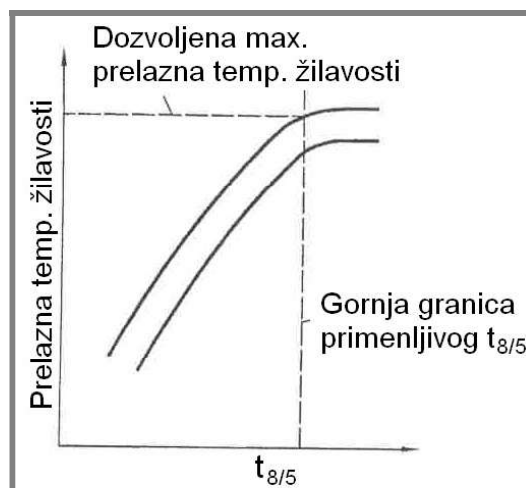
$$\text{-Za T spoj } d_m = \frac{d_1 + 2d_2}{3} \quad (8)$$



Slika 4: Uticaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na vrednost tvrdoće u ZUT zavarenog spoja [6]



Slika 5: Uticaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na vrednost žilavosti (J) u ZUT [6]



Slika 6: Uticaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na prelaznu temperaturu žilavosti u ZUT [6]

TERMIČKA OBRADA POSLE ZAVARIVANJA

Kod čelika koji otvrdnjavaju ubrzanim hlađenjem, uključujući normalizaciju i otpuštanje, i kaljenje i otpuštanje, termička obrada posle zavarivanja nije dozvoljena. Prihvatljivo je samo žarenje za smanjenje napona kada je to neophodno, kao što je to u izradi posuda za agresivne medije, naročito kod reparaturnog zavarivanja. Temperatura i vreme žarenja su ograničeni na donje granične vrednosti za sniženje napona. Kod QT čelika temperatura žarenja treba da bude ispod temperature otpuštanja za najmanje 30°C. Zavisno od vrste čelika $T_z = 530-580^\circ\text{C}$, a vreme žarenja najduže 90 min. Preporuke za termičku obradu posle zavarivanja se daju u standardima za čelične proizvode.

Kod primene žarenja za smanjenje napona kod nekih vrsta čelika moguća je pojava prslina usled ponovnog zagrevanja ("reheat cracking" ili "stress relief cracking") koje su po pravilu interkristalne, a posledica su sniženja plastičnosti granica zrna usled efekta izlučivanja i taložnog otvrdnjavanja. Pojavi ovih prslina posebno su skloni čelici sa prevelikom količinom Nb [1, 3-5].

Kod M čelika, zbog prisustva elemenata za otvrdnjavanje taloženjem, moguće je izlučivanje i sniženje plastičnosti granica zrna, te postoji veća je opasnost od pojave u ZUT prslina usled ponovnog zagrevanja.

Uticajni faktori za pojavu prslina usled ponovnog zagrevanja su:

- hemijski sastav čelika;
- termički ciklus zavarivanja;
- sopstveni naponi u području zavarenog spoja, i
- uslovi termičke obrade posle zavarivanja.

Za preliminarnu ocenu sklonosti određenog čelika ka nastanku prslina usled ponovnog zagrevanja može se koristiti empirijska jednačina (9):

$$P_{sp} = \% \text{Cr} + \% \text{Cu} + 2\% \text{Mo} + 10\% \text{V} + 7\% \text{N} + 5\% \text{Ti} - 2$$

(9)

Ako je $P_{sp} \geq 0$ postoji opasnost od pojave prslina usled ponovnog zagrevanja [1].

STANDARDIZOVANI JUS EN FINOZRNI ČELICI

Objavljeni JUS EN standardi za konstrukcije (S) čelike odnose se na toplovaljane proizvode od zavarljivih finoizrni čelika, grupe standarda JUS EN 10113- deo 1, deo 2 i deo 3:

- JUS EN 10113 – deo 1:2004; Opšti zahtevi za isporuku, kojim se utvrđuju opšti zahtevi za isporuku zavarljivih finoizrni konstrukcionih kvalitetnih i specijalnih čelika, stanja isporuke N i M, sa odredbama o opštim i dodatnim zahtevima pri ugovaranju isporuke, tehničkim i tehnološkim zahtevima, kontrolisanju i ispitivanju.
- JUS EN 10113 - deo 2:2004; Zahtevi za isporuku čelika u normalizovanom stanju i stanju posle valjanja uz normalizaciju. Standardom su obuhvaćeni nelegirani kvalitetni čelici vrste čelika od S275 i S355 i legirani specijalni čelici S420 i S460, sa garantovanim osobinama žilavosti do -20°C (čelici oznake N) i do -50°C (čelici oznake NL).
- JUS EN 10113 - deo 3:2004; Zahtevi za isporuku čelika dobijenih termomehaničkim valjanjem., Obuhvataju grupu nelegiranih kvalitetnih čelika (S275 i S355) i legiranih specijalnih čelika (S420 i S460) garantovane žilavosti do -20°C (S275M, S355M, S420M, S460M) i garantovane žilavosti do -50°C (S275ML, S355ML, S420ML, S460ML).

Objavljeni JUS EN standardi za čelike za opremu pod pritiskom (P) odnose se na pljosnate proizvode grupe standarda JUS EN 10028- deo 1, deo 2, deo 3:

- JUS EN 10028 - deo 1:2004; Opšti zahtevi, kojim se utvrđuju opšti zahtevi za čelike za opremu pod pritiskom koji su obuhvaćeni standardima JUS EN 10028 - deo 2 do deo 7, sa specifičnostima u



zahtevima za čelike svakog dela standarda, odnosno različitih grupa čelika čija je zajednička osobina namena (oprema pod pritiskom).

- JUS EN 10028- deo 2:2004; Nelegirani i legirani čelici sa osobinama utvrđenim za povišene temperature obuhvata finozne N čelike P235GH, P265GH, P295GH i P355GH. Za ove čelike prilikom naručivanja može da se utvrdi najveća vrednost ugljeničnog ekvivalenta prema IIW formuli. Ostale vrste čelika pripadaju niskolegiranim Mo i Cr-Mo čelicima za povišene temperature (čelici otporni na tečenje - puzanje).
- JUS EN10028- deo 3:2004; Zavarljivi finozni konstrukcioni čelici, normalizovani. Ovaj standard najviše zamenjuje JUS C.B0.502:1979. Obuhvata četiri grupe kvaliteta čelika: osnovni (P275N, P355N, P460N); za povišene temperature (P275NH, P355NH, P460NH); za niske temperature (P275NL1, P355NL1, P460NL1); specijalni za niske temperature (P275NL2, P355NL2, P460NL2).
- JUS EN10028 - deo 5:2004; Zavarljivi finozni čelici termomehanički valjani. Grupisani su u tri kvaliteta: osnovni (P355M, P420M, P460M) garantovane žilavosti do -20°C; garantovane žilavosti do -40°C (P355ML1, P420M L1, P460M L1); garantovane žilavosti do -50°C (P355ML2, P420M L2, P460M L2). Napominje se da za sada nema odgovarajućih rezultata koji bi omogućili da se standardizuju osobine ovih čelika na povišenim temperaturama. Takođe, standard u tački 8.7- zavarljivost, daje napomenu da „produžena termička obrada posle zavarivanja može da dovede do pogoršanja mehaničkih osobina“. S tim u vezi, predviđa se razmatranje prihvatljivosti termičke obrade posle zavarivanja sa zahtevanim Holomon – Džefijevim (Hollomon - Jaffee) parametrom:

$$P = T_s (20 + \lg t) \times 10^{-3} = 17$$

gde je:

T_s – temperatura žarenja za smanjenje napona, °C;

t – vreme držanja na toj temperaturi, h.

Osobine materijala utvrđene takvom termičkom obradom proveravaju se ispitivanjem uzorka podvrgnutog simuliranoj termičkoj obradi.

- JUS EN10028- deo 6:2004; Zavarljivi, kaljeni i otpušteni finozni čelici. Obuhvata četiri grupe čelika: osnovni (P355Q, P460Q, P500Q, P690Q); za povišene temperature (P355QH, P460QH, P500QH, P690QH); za niske temperature do -40°C (P355QL1, P460QL1, P500QL1, P690QL1); za niske temperature do -60°C (P355QL2, P460QL2, P500QL2, P690QL2). Svi ovi čelici su specijalni legirani.

UMESTO ZAKLJUČKA

Primena finoznih čelika za izradu zavarenih nosećih čeličnih konstrukcija i posuda pod pritiskom je nesumnjivo značajan faktor povećanja ekonomičnosti proizvodnje i sigurnosti u eksploataciji. Širok asortiman standardizovanih vrsta ovih čelika omogućava racionalan izbor u odnosu na konstruktivne karakteristike proizvoda i ekonomičnost izrade, uključujući i ekonomičnost procesa zavarivanja. Za realizaciju ekonomičnosti u procesu zavarivanja od posebnog su značaja rešenja data u preporukama za zavarivanje (pr.JUS EN 1011-2:2005) u kojima su, između ostalog, dati sveobuhvatni pristupi izboru dodatnog materijala sa aspekta sadržaja difundovanog vodonika, količine unete toplote pri zavarivanju, i stim u vezi primene i određivanja temperature predgrevanja korišćenjem datih dijagrama.

LITERATURA

- [1] Beckert: Kompendium der Schweisstecnik, Band 3: Eignung metalischer Werkstoffe zum Schweißen, DVS Verlag; 1997.
- [2] N. Radović: Razvoj čelika za izradu zavarenih konstrukcija povišene sigurnosti; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br. 3/2001, str.81; DUZS, Beograd.
- [3] N. Yurioka: TMCP čelici i njihovo zavarivanje; IIW doc.IX-1739-94; Prevod: M. Antić; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.1-2/2001, str.37; DUZS, Beograd.
- [4] Peter Gerster: Schweißen moderner hochfester Baustähle; Manuskript SLV München, 1999.
- [5] Zavarljivi finozni konstrukcioni čelici; Pravila za preradu, posebno za zavarivanje topljenjem; SEW 082 i 088.
- [6] pr.JUS EN 1011-2:2005: Zavarivanje; Preporuke za zavarivanje metalnih materijala-Deo 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika.
- [7] JUS ISO 4885:2003: Proizvodi od čelika i gvožđa; Termička obrada; Rečnik.



Milica Antić

Glavna i odgovorna urednica časopisa od 2013 – 2020. godine

Reprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije, broj 3, 2004. godina, str. 119 - 121.

M. Antić

ZNAČAJ IZBORA MATERIJALA PRI ZAVARIVANJU I PRIMER NENAMENSKE UPOTREBE HARTFIELDOVOG ČELIKA

IMPORTANCE OF THE MATERIALS SELECTION IN WELDING AND INADEQUATE USE OF HARTFIELDS STEEL

Stručni rad/ Professional paper

UDK/UDC: 621.791:669.15'74-194.3

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2004.

Ključne reči: Izbor materijala, manganski čelici, Hartfieldov čelik, zavarivanje

Izvod

U radu je istaknut značaj izbora materijala pri zavarivanju i opisana je tehnologija zavarivanja četvorougaoznog profila od visokomanganskog čelika (Č.3160) za čeličnu konstrukciju tramvajskog depoa izradjenu od Č.0361. Poseban akcenat je na karakteristikama čelika Č.3160, s obzirom na njegovu uslovnu zavarljivost. Takode je dat osvrt na pogrešan odabir ovog čelika za šine u tramvajskom depou.

Adresa autora / Author's address:

Milica Antić, Zavod za zavarivanje, Beograd,

Keywords: Materials selection, Mn steel, Hartfields steel, welding

Abstract

The importance of the materials selection in welding and welding technology of quadrangle profile of the high Mn steel (GX120Mn12) for steel construction of the trams depot made of S235JRG2 has been presented in the paper. Special attention has been paid to the GX120Mn12 steel characteristics, regarding its conditional weldability. The wrong selection of this steel for the tram's rail is also briefly reviewed.

UVOD

Izbor materijala za primenu u zavarenim konstrukcijama podrazumeva razmatranje niza faktora, uključujući projektne zahteve i propise koji se moraju zadovoljiti. Pokretne konstrukcije, kao što su automobili, vozovi ili avioni imaju potpuno različite zahteve za materijalima kao što su težina, trajnost i sigurnost, u odnosu na statične konstrukcije kao što su zgrade i mostovi.

U svim slučajevima, ekonomičnost, odnosno pravilan izbor materijala za karakteristike i predviđeni vek trajanja konstrukcije, kao i cena izrade su od najvećeg značaja. Projektni zahtevi i iskustvo predstavljaju glavnu osnovu za izbor materijala za izradu konstrukcija, ali i za njihovu popravku i održavanje [1]. U ovom radu je prikazan primer neadekvatnog izbora materijala za zavarivanje i posledice koje su iz toga proizašle.

Za šinu za otvoreni deo kanala za popravku tramvaja u tramvajskom depou u Beogradu, upotrebljen je pravougaoni profil dimenzija 60 x 40 mm od čelika

Č.3160. Zadatak pri zavarivanju je bio spajanje šina sa I nosačima dimenzija 180 x 180 mm od čelika Č.0361 na postolju čelične konstrukcije u kanalu, zatim međusobno spajanje šina, kao i njihovo spajanje sa standardnim tramvajskim šinama. Na osnovu proračuna nosivosti zavarenog spoja, obavljeno je zavarivanje. Izbor materijala i vrstu zavarenog spoja dao je projektant. Nakon završetka zavarivanja i kontrolisanja kanala u tramvajskim depoima, depoi su pušteni u rad. Posle vrlo kratkog vremena od nekoliko meseci, na popravku je dovežen tramvaj sa neispravnim električnim i elektrootpornim kočnicama, a magnetna kočnica nije mogla da reaguje na nemagnetičnoj šini. Posle manjeg incidenta kada je došlo do prevrtanja tramvaja i uništenja vrata depoa, neko je pročitao uputstvo za zavarivanje gde je pisalo da je čelik Č.3160 nemagnetičan, tako da je trebalo ukloniti ove šine i postaviti i zavariti adekvatni materijal Č.1731.



OSNOVNE KARAKTERISTIKE HARTFIELDVOG ČELIKA (Č.3160)

Visokomanganski čelik austenitnog tipa, oznake Č.3160, koga karakteriše hemijski sastav sa sadržajem mangana od najmanje 10 puta većim od sadržaja ugljenika, naziva se Hartfieldov čelik. Specifične karakteristike ovog čelika su velika sposobnost ojačavanja (porast čvrstoće odnosno tvrdoće) i time visoka otpornost na habanje. Otpornost ovog čelika prema habanju je najveća gde se pored habanja javlja i očvršćavanje na hladno, odnosno gde je čelik u eksploataciji izložen većem pritisku ili udarcima.

Za razliku od drugih austenitnih čelika, manganski čelici imaju daleko veću sklonost ka otvrdnjavanju deformacijom. Ojačanje pri plastičnoj deformaciji vezano je za stvaranje martenzita, mada mehanizam ovog otvrdnjavanja nije u potpunosti objašnjen. Razlika u odnosu na konvencionalne čelike je to što ovaj čelik postaje žilav nakon kaljenja u vodi, a krt posle termičke obrade žarenjem. Kao i kod drugih austenitnih (visokolegiranih nerđajućih čelika), i ovaj kaljenjem („gašenjem“) zadržava austenitnu strukturu ali uz različite brzine hladenja. Pri sporom hladenju dolazi do izdvajanja karbida po granicama zrna, što uzrokuje promenu osobina, odnosno krtost. Zbog visoke otpornosti na habanje, od Hartfieldovog čelika se izrađuju delovi izloženi visokom naprezanju kod bagera, drobilica, skretnica, transportnih uređaja itd.

Kao i većina austenitnih čelika, i ovaj čelik je nemagnetičan. Čelik je sposoban za zavarivanje i navarivanje. Pri zavarivanju ovog čelika neophodno je nastojati da se toplota razvijena zavarivanjem dovoljno brzo odvodi u cilju dobijanja što manje količine karbida, odnosno postizanja postojane žilave austenitne strukture [2,3].

ZAVARIVANJE

Hemijski sastav osnovnih materijala - čelika, korišćenih kod primarne popravke, a zatim i nakon zamene neodgovarajućeg čelika prikazan je u tabeli 1.

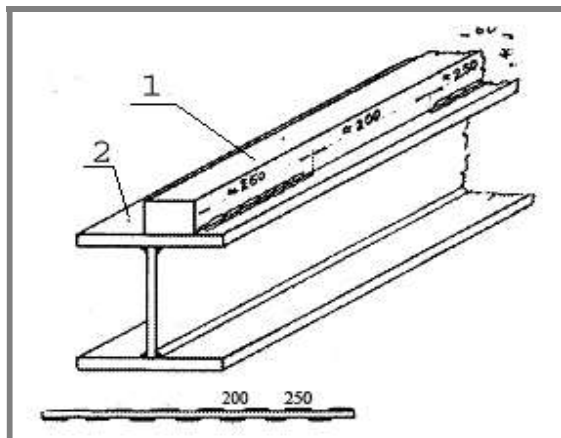
Na osnovu proračuna nosivosti zavarenog spoja, definisano je zavarivanje prekidnim ugaonim spojem, a visina ugaonog šava $a=6\text{mm}$ zadovoljava uslov nosivosti računat za I nosač. S obzirom na korišćene čelike i okolnosti u kojima je trebalo zavarivati: ugaoni prekidni spoj, opremljenost naručioca i sl., odabran je postupak zavarivanja 111 (ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom). Odabrane obložene elektrode su, prema EN 1600 oznake E18 8Mn B12, a primenjena je elektroda komercijalnih oznaka INOX 18/8/6 i UTP63.

Prvo zavarivanje šina od Č.3160 i I nosača (Č.0361) vršeno je elektrodom INOX 18/8/6 prečnika 3.25mm, do 3 prolaza i sa strujom jačine 95-120 A, bez predgrevanja. Posle čišćenja ivica elemenata i postavljanja elemenata, izvedeni su spojevi pripoja i to u vidu kratkih navara dužine do 20 mm, na isti način kao i zavari. Zavarivanje je izvedeno samo podužnim pomeranjem elektrode, bez ikakvog poprečnog kretanja, poštujući redosled zavarivanja, saglasno skici na tehnološkim kartama. Dužina zavara je približno 40 mm. Potrebna visina ugaonog spoja izvedena je iz 3 zavara. Zavareni spojevi izvedeni su naizmeničnim rasporedom sa obe strane i prekidima u dužini od približno 200 mm. Ukupna dužina svakog segmenta je približno 250 mm. Posle izvođenja svakog zavara, zavari se hlade vodom u trenutku kada je sav rastop obloge i šava prešao u čvrsto stanje. Po završenom hladenju, troska je uklonjena zavarivačkim čekicem i čeličnom četkom, a zona zavarivanja ponovo hlađena mlazom vode. Skica zavarivanja prikazana je na slikama 1 i 2.

Tabela 1: Hemijski sastav korišćenih čelika

Table 1: Chemical composition of the used steels

Oznaka čelika		Hemijski sastav, mas%					
Evropski standard	JUS	C	Si	Mn	P	S	Fe
GX120Mn12 (SEW 395)	Č.3160	~ 1.2	~ 0.4	~ 12.5	~ 0.060	~ 0.050	ost.
S235JRG2 (EN 10025)	Č.0361	max. 0.17	max. 0.35	max. 0.60	max. 0.050	max. 0.050	ost.
C 60 (EN 10083-2)	Č.1731	0.57-0.65	0.15-0.35	0.60-0.90	0.035	0.035	ost.



Slika 1: Shematski prikaz zavarivanih elemenata sa raspredom i dužinom zavara, (1-šina, 2- I nosač).

Figure 1: Schematic presentation of the welds disposition and length of welded elements, (1-trains rail, 2- I profile).

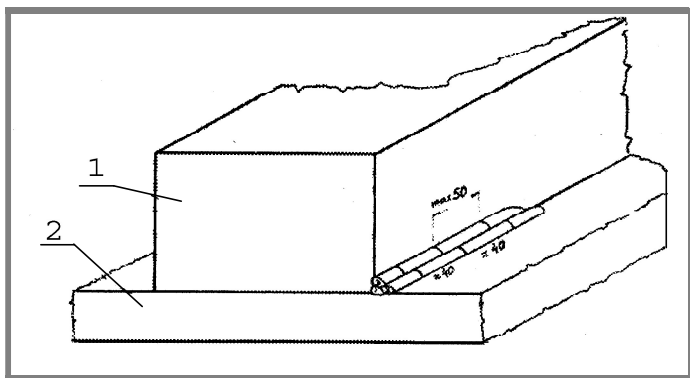
Ponovno zavarivanje šina, ali od čelika Č.1731 i I nosača Č.0361 obavljeno je elektrodom UTP 63 prečnika 4.00 mm, sa 2 prolaza i sa strujom jačine 100-130 A, sa predgrevanjem na 300°C. Izvodjenje spojeva vršeno je kao i u prethodnom slučaju. Skica zavarivanja prikazana je na slici 3 [4].

ZAKLJUČAK

S obzirom na veliku vremensku distancu od trenutka ugradnje šina od Č.3160, njihovog uklanjanja i ponovne ugradnje šina od Č.1731, mukotrpnog danonoćnog, višemesečnog angažovanja zavarivača, ispitivača, inženjera zavarivanja i drugog osoblja na ovom poslu, a u cilju poštovanja tada postavljenih rokova, od interesa je pomenuti da „krivci“ za odabir ili nabavku

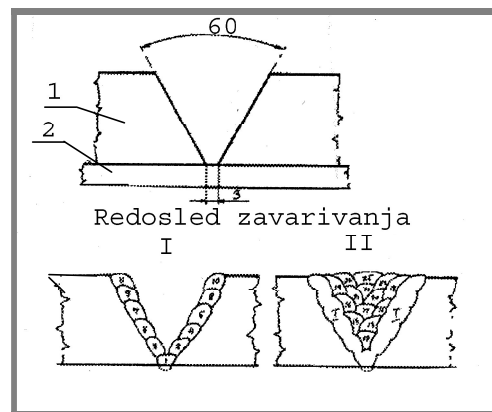
neodgovarajućeg materijala nisu nađeni. Objašnjenje za permutaciju brojčanih oznaka čelika može izgledati neozbiljno, ali u ovom slučaju prouzrokovalo je, pored ostalih troškova, odbacivanje 40 tona visokokvalitetnog čelika.

Dakle, oznaka čelika nije samo broj, to je poput slike u našim pasošima. Ali, kao što ni svi podaci u našim ispravama ne znače mnogo bez ličnog kontakta, tako i oznaka čelika i njegove minimalno zahtevane (standardom određene) osobine često nisu dovoljne za adekvatnu upotrebu, a pogotovu ako ga je potrebno i zavariti.



Slika 2: Shematski prikaz detalja zavarivanih elemenata, (1-šina, 2- I nosač).

Figure 2: Schematic presentation of the welded elements details (1-trains rail, 2- I profile).



Slika 3: Shematski prikaz redosleda pri zavarivanju Č.1731 i Č.0361.

Figure 2: Schematic presentation of the welding sequence for the steels C60 and S235JRG2.

LITERATURA

- [1] D. Thomas: ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, 1993, ASM Int., str. 373.-395.
- [2] H. Šuman: Metalografija, prevod sa nemačkog, Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1968.
- [3] Katalog proizvoda Železare Ravne, Ravne.
- [4] M. Antić, V. Sabolić: Projekat tehnologije zavarivanja četvorougaoanog čelika Č 3160 za čeličnu konstrukciju tramvajskog depoa na Novom Beogradu, Zavod za zavarivanje, Beograd, 1986
- [5] Katalog proizvoda Železare Ravne, Ravne.
- [6] M. Antić, V. Sabolić: Projekat tehnologije zavarivanja četvorougaoanog čelika Č 3160 za čeličnu konstrukciju tramvajskog depoa na Novom Beogradu, Zavod za zavarivanje, Beograd, 1986



Zoran Odanović

Glavni i odgovorni urednik časopisa od 2004 – 2010. godine i od 2020 – 2025. godine

Reprint rada - Zavarivanje i zavarene konstrukcije, broj 1, 2002. godina, str. 3 - 8.

Z. Odanović

NUMERIČKA SIMULACIJA TOPLOTNOG REŽIMA PROCESA ZAVARIVANJA ČELIKA*

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN STEEL WELDING PROCESS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK/UDC: 621.791:536.2.001.57

Rad primljen / Paper received: 04.09.2001.

Adresa autora / Author's address:

Dr Zoran Odanović

Vojnotehnički institut VJ

Katanićeva 15, 11000 Beograd

Ključne reči:

zavarivanje, proračun + simulacija, protok

Keywords:

Welding, Computation + Simulation, Flow

Izvod

U radu je prikazana numerička simulacija prenosa toplote pri procesu elektrolučnog zavarivanja. Okosnicu metoda simulacije čini razvijeni dvodimenzionalni i numerički model nestacionarnog prenosa toplote pri zavarivanju. Model omogućava proračun dimenzija spoja, kao i vremenskih parametara, kao što je vreme hlađenja u kritičnom intervalu od 800 do 500 °C. Provera i potvrda modela obavljena je kroz eksperimente izrade modelnih zavarenih spojeva. Primenjen je MAG postupak zavarivanja čelika Nionikral 70 (NN70). Dobijeni rezultati pokazuju zadovoljavajuću tačnost numeričkog modela koja je potvrđena poređenjem proračunatih i izmerenih dimenzija spoja, kao i brzina hlađenja. Odstupanje proračunatih dimenzija od izmerenih u proseku iznosi 14 %, a odstupanje proračunatih brzina hlađenja u odnosu na izmerene iznosi prosečno 6 %. Prikazani model je dobra osnova za razvoj modela predviđanja struktura i osobina u ZUT zavarenog spoja čelika.

Abstract

A numerical heat transfer simulation during the arc welding is presented. Simulation method is based on two-dimensional transient heat transfer model. Calculations of weld joint dimensions and cooling rates in critical temperature interval from 800 to 500 °C are performed. For model calibration and verification two series of welding experiments are applied. A series of welds are produced by CO₂ shielding GMA welding method on Q & T low alloy steel HY 100. Obtained results show that accuracy of numerical model is very satisfactory and are verified by the comparison with calculated and measured joint dimensions and cooling rates. Numerical results of weld joint geometry deviate from measured values by 14 %. Calculated cooling rates deviate from measured values by 6 %. Presented numerical model could be used as base for developing a model for structure and properties anticipation in weld joints.

UVOD

Računarske i informativne tehnologije našle su široku primenu u svim oblastima nauke, tehnike, industrije, kao i u svakodnevnom životu. Primena računara u oblasti zavarivanja može obuhvatiti: analizu troškova nekog procesa, planiranje tehnologije procesa zavarivanja, predviđanje ponašanja zavarenih spojeva u eksploatacijskim uslovima, upravljanje robotima za zavarivanja velikih serija i dr. Dobijanje potrebnih informacija u oblasti zavarivanja uz pomoć računara zasniva se na nekoj od sledećih metodologija:

- **bazi podataka**, sa rezultatima testova zavarivosti, na primer za hladne i tople prsline, ili proverenim parametrima zavarivanja za pojedine konkretne slučajeve;
- **empiriskim ili parametarskim jednačinama**, koje uzimaju u obzir glavne parametre zavarivanja u analitičkom obliku, i na osnovu kojih se može predvideti zavarivost metala iz podataka hemijskog sastava i parametara zavarivanja;
- **ekspertskim sistemima**, koji se zasnivaju na primeni raspoloživih znanja i mogu se koristiti za: izbor procesa zavarivanja, procene i sprečavanja zavarivačkih grešaka, izbor dodatnog materijala, projektovanje i optimizaciju zavarenih komponenti i dijagnostiku zavarenih konstrukcija;
- **matematičkim modelima**, koji omogućavaju analizu kompleksnih fenomena koji karakterišu procese zavarivanja, kao što su: prenos toplote, metalurške

promene u osnovnom metalu i metalu šava, zaostali naponi i dilatacije [1, 2].

Razvoj savremenih čelika i drugih legura visoke čvrstoće zahteva i razvoj odgovarajućih tehnologija zavarivanja. U slučajevima kada ne postoji dovoljno prethodnih iskustava, oslanjanje isključivo na eksperimentisanje zahteva puno vremena i sredstava. Analitičke metode su se pokazale kao vrlo korisne i mogu značajno da smanje vreme i troškove za dobijanje potrebnih informacija.

Razvojem računarske tehnike numeričke metode su se nametnule kao jedna od ključnih mogućnosti za modeliranje procesa zavarivanja i time ekonomičnog dobijanja neophodnih podataka za definisanje tehnologije zavarivanja. Kompleksnost procesa koji se odvijaju tokom zavarivanja, kao i nelinearna priroda protoka toplote tokom procesa, predstavljaju veliki problem pri pokušajima uspešnog modeliranja procesa zavarivanja.

Uspešno modeliranje i predviđanje zaostalih napona, distorzija i čvrstoće zavarenog spoja zahteva pouzdanu analizu termalnog ciklusa, kroz poznavanje maksimalnih temperatura u spoju i vremena hlađenja u kritičnoj oblasti od 800 ÷ 500 °C. Ovi faktori prvenstveno utiču na veličinu šava, veličinu zone pod uticajem toplote (ZUT), i zajedno sa hemijskim sastavom i transformacionom kinetikom definišu strukturu spoja.

Prve analize temperaturnih polja pri zavarivanju zasnivale su se na analitičkim rešenjima Fourier diferencijalne jednačine prenosa toplote, primenjenoj za slučaj pokretnog izvora

* Izlagano oktobra 2001, međunarodna konferencija "Stanje i perspektiva zavarivanja na početku novog veka".



toplote koje su definisali Rosenthal [3] i Rikalin [4]. Međutim, analitička rešenja imaju vrlo ograničenu primenu za rešavanje praktičkih problema. Sa napretkom računarskih tehnologija i razvojem numeričkih tehnika, kao što je metoda konačnih razlika i metoda konačnih elemenata, nastali su mnogobrojni egzaktniji termalni modeli. Oni su omogućavali dodatnu analizu fenomena uključujući nelinearne termalne osobine, latentnu toplotu, kao i različite geometrije zavarenog spoja. Simulacija procesa zavarivanja metodom konačnih razlika prikazana je u radovima Pavelića [5], Grill [6], Kou [7] i dr. Primena metode konačnih elemenata prikazana je u radovima Friedmana [8], Krutz [9] i Goldak [10]. Poseban problem predstavlja numerička simulacija MAG postuka zavarivanja, što je razmatrano u radovima [11-13].

U ovom radu razvijen je i prikazan numerički model zavarivanja, zasnovan na toplotnom bilansu procesa. Provera i potvrda modela vršena je na eksperimentalno dobijenim podacima tokom MAG postupka zavarivanja.

NUMERIČKI MODEL PROCESA ZAVARIVANJA

Matematičko modeliranje predstavlja pokušaj kvantitativnog opisa nekog fizičkog procesa ili nekog fenomena fizičkog procesa, kroz sistem algebarskih ili diferencijalnih jednačina, zajedno sa polaznim i graničnim uslovima. Principijelni značaj matematičkog modeliranja ogleda se u sledećim aspektima:

- omogućava teorijsku analizu promene procesnih promenljivih uz primenu računara, a u cilju optimizacije i praćenja toka procesa. Time se omogućava smanjenje značajnih troškova industrijskih i poluindustrijskih eksperimenata;
- unapređenje opšteg razumevanja suštine pojedinih procesa i međuzavisnosti osnovnih procesnih promenljivih;
- može da pomogne pri planiranju, projektovanju, kao i interpretaciji rezultata poluindustrijskih i industrijskih ispitivanja.

Matematički modeli mogu biti klasifikovani na razne načine. Uglavnom se koristi klasifikacija na osnovu vremenske baze: na stacionarne modele, kod kojih se promenljive lokalno ne menjaju sa vremenom, pa su svi akumulativni članovi sistema jednaki nuli, i nestacionarne ili dinamičke modele, kod kojih se zavisno promenljive lokalno menjaju sa vremenom. Dinamičke modele karakteriše daleko veća prilagodljivost i višestranost u odnosu na stacionarne modele, ali u isto vreme su kompleksniji i skuplji.

Razvoj matematičkog modela nekog procesa karakteriše više faza, kao što su: postavka problema, matematička formulacija, matematičko rešenje, potvrda, i kao krajnji cilj, primena modela. Postavka modela mora da zadovolji osnovne relacije bilansa energije i mase. Matematička formulacija predstavlja opis procesa kroz sistem algebarskih ili diferencijalnih jednačina, uz definisanje polaznih i graničnih uslova. Matematičko rešavanje može biti analitičko ili numeričko. Po pravilu modeli se rešavaju numeričkim metodama, dok su analitička rešenja korisna u proveru pouzdanosti dobijenih numeričkih rešenja. Izbor numeričkog metoda rešavanja zavisi od više faktora, kao što su vreme rada računara, cena i potrebna tačnost metode. Potvrda modela je od vitalnog značaja u razvoju modela, i od ove faze se zahteva da model osigura verno simuliranje procesa. Pretpostavke modela se proveravaju praktičkim merenjem parametara procesa u realnim uslovima u pogonu, u poluindustrijskim optima ili na fizičkom modelu. Poslednja faza je primena modela radi simuliranja i predviđanja toka nekog procesa. Međutim, i u ovoj fazi moraju se imati u vidu ograničenja, kao rezultat usvojenih pretpostavki, ugrađenih u matematički model [14].

Model prenosa toplote pri zavarivanju, koji je razvijen i prikazan u ovom radu, zasniva se na proračunu toplotne ravnoteže procesa elektrolučnog zavarivanja. Nelinearni

sistem je redukovao do kvazi-stacionarnih uslova. Prenos toplote je opisan Fourier diferencijalnim jednačinama provođenja toplote, graničnim i polaznim uslovima. Kao rezultat numeričkog proračuna dobijeno je temperaturno polje zavarenog spoja u zavisnosti od položaja električnog luka, odnosno vremena zavarivanja. Složenost i kompleksnost procesa zavarivanja, kao i ponašanje materijala tokom procesa, zahtevali su uvođenje u model određenih pretpostavki i uopštenja [15]:

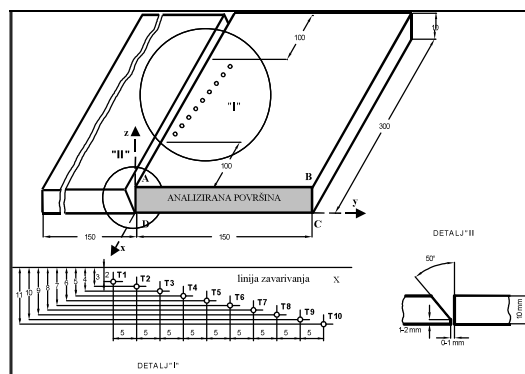
1. Izvršena je analiza samo fenomena prenosa toplote, dok je zanemarena analiza napona i deformacija materijala, kao rezultat procesa zavarivanja.
2. Granični uslovi obuhvatili su konvekciju i radijaciju, i prikazani su analitičkim izrazom.
3. Korišćene su temperaturne zavisnosti toplotne provodljivosti i specifične toplote [16].
4. Toplote reakcija topljenja i očvršćavanja su obuhvaćene indirektno, kroz temperaturnu zavisnost specifične toplote.
5. Isparavanje metala tokom procesa se zanemaruje.
6. Prostiranje toplote je osno simetrično u odnosu na centralnu liniju zavarivanja.
7. Za definisanje raspodele energije u izvoru toplote primenjen je osno simetrični elipsoidni model Goldaka [10].
8. Za rešavanje diferencijalnih jednačina provođenja toplote primenjena je numerička metoda konačnih razlika.

Proračun raspodele temperatura u metalu koji se zavaruje u funkciji položaja i vremena zavarivanja – $T(x, y, z, t)$, zasniva se na rešavanju jednačine nestacionarnog provođenja toplote, date u obliku paraboličnih diferencijalnih jednačina:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q = \rho * c * \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

gde je: Q - uneta ili odvedena toplota (Wm^{-3}), k - toplotna provodljivost ($Wm^{-1}K^{-1}$), T - temperatura (K), t - vreme (s), ρ - gustina (kgm^{-3}), c - specifična toplota ($Jkg^{-1}K^{-1}$).

Proračun temperaturnih polja, zasnovan na rešavanju trodimenzionalne jednačine (1), zahteva dugo računarsko vreme, ako se rešava nekim od numeričkih metoda. Međutim, ako se pretpostavi da se izvor toplote kreće konstantnom brzinom duž prave linije na definisanom putu, i ako se zanemare efekti početka i kraja zavarivanja, može se usvojiti da su uslovi pod kojima se odvija zavarivanje kvazistacionarni. Uvođenjem pokretnog koordinatnog sistema, čiji se početak postavlja na izvor toplote, raspodela temperatura se može smatrati stacionarnom u odnosu na pokretni koordinatni sistem. U tom slučaju moguće je, a i racionalno je, analizu vršiti u ravni normalnoj na pravac zavarivanja, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz uzorka za eksperimente zavarivanja sa referentnom ravni i položajem termoparova

Za slučaj elektrolučnog zavarivanja čelika brzina kretanja izvora toplote je daleko veća od brzine provođenja toplote u



pravcu kretanja izvora toplote. Tada se neto protok toplote unutar bilo kojeg beskonačno malog elementa na poprečnom preseku zavarenog spoja, koji je normalan na pravac zavarivanja, može zanemariti u odnosu na toplotu koja se provodi kroz sam isečak, odnosno $\delta T / \delta x = 0$, pa se prvi član u jednačini (1) može zanemariti. Razvijanjem jednačine (1) i primenom metode konačnih razlika dobija se jednačina (2), koja opisuje provođenje toplote u centralnom delu komada koji se zavaruje, i gde je $k_{j,i} = BM_{j,i} \cdot T_{j,i}$. U ovoj jednačini $T_{j,i}$ je poznata temperatura u određenom vremenskom trenutku, a $T_{j,i}^*$ temperatura u sledećem vremenskom koraku, za vremenski pomeraj od Δt . Član $Q_{j,i}$ predstavlja toplotni fluks tokom procesa, koji može biti pozitivan ili negativan. Unos toplote električnim lukom ima pozitivan znak, ili je negativan, kada postoje gubici toplote konvekcijom ili radijacijom. Ako u nekoj tački posmatranog sistema (ravan ABCD na sl. 1) postoji dovod i odvod toplote, ovaj član je jednak toplotnom bilansu u toj tački.

Za proračun temperaturnih polja pri elektrolučnom zavarivanju, kao polazni uslov usvojeno je da se sve tačke u komadu koji se zavaruje, a time i u referentnoj ravni ABCD sa slike 1, na početku zavarivanja nalaze na jednakoj, sobnoj temperaturi, odnosno:

$$T_{0,j,i} = 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300 \text{ K, za vreme } t = 0 \text{ s}$$

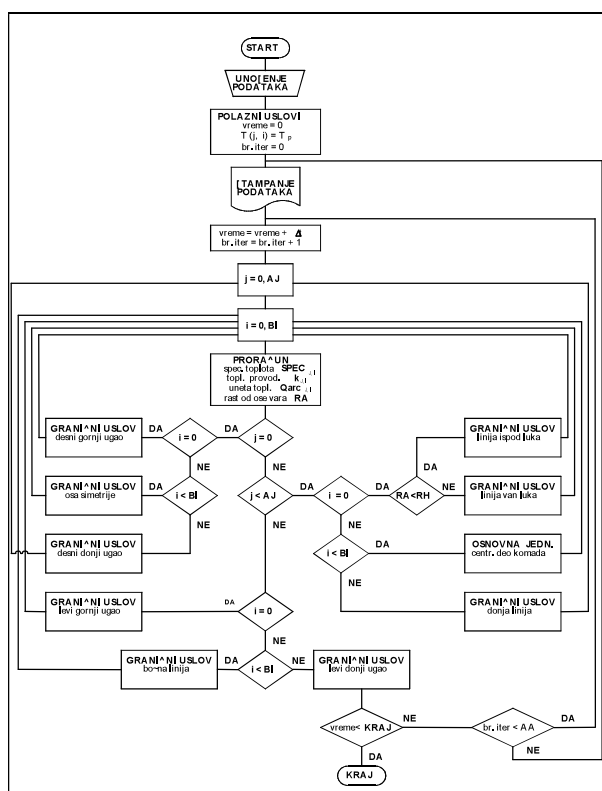
Model i način proračuna omogućavaju korišćenje i neke druge temperature, različite od sobne, što znači da je moguće vršiti celokupan proračun za uslove kada se zavaruje predgrejan komad.

Granični uslovi modela definisani su kroz jednačine koje opisuju prenos toplote iz elemenata referentne površine, koji

se nalaze na gornjoj, donjoj i bočnoj površini, kao i na liniji koja se nalazi na pravcu zavarivanja i uglovima referentne ravni ABCD. Za primenjeni proračun korišćeni su granični uslovi:

1. Na centralnoj liniji zavarenog spoja ($y = 0$ i $0 < z < d$): $\delta T / \delta y = 0$, $T_{j-1,i} = T_{j+1,i}$.
2. Na gornjoj površini ploče koja se zavaruje ($z = 0$ i $0 < y < w$), $T_{j,i+1} = T_{j,i-1}$. Na ovoj površini razlikujemo dve oblasti u zavisnosti od toplotnih uslova koji važe, i to u oblasti ispod električnog luka i van njega. Uslov toplotnog bilansa ispod izvora toplote, električnog luka, ima oblik: $Q_{j,i} = Q_{arc\ j,i} - Q_{con\ j,i} - Q_{rad\ j,i}$, gde je: $Q_{j,i}$ - ukupna toplota za element j,i (Wm^{-3}), $Q_{arc\ j,i}$ - količina unete toplote izvorom - električnim lukom (Wm^{-3}), $Q_{con\ j,i}$ - gubitak toplote usled konvekcije (Wm^{-3}), $Q_{rad\ j,i}$ - gubitak toplote usled radijacije (Wm^{-3}). U oblasti izvan direktnog dejstva izvora toplote član $Q_{arc\ j,i} = 0$, odnosno izvan izvora toplote važi da je $Q_{j,i} = (Q_{con\ j,i} + Q_{rad\ j,i})$.
3. Na donjoj površini komada koji se zavaruje, ($z = d$ i $0 < y < w$), je $T_{j,i+1} = T_{j,i-1}$ i $Q_{j,i} = (Q_{con\ j,i} - Q_{rad\ j,i})$.
4. Na bočnoj površini komada koji se zavaruje ($y = w$ i $0 < z < d$) je $T_{j+1,i} = T_{j-1,i}$ i $Q_{j,i} = -(Q_{con\ j,i} + Q_{rad\ j,i})$.
5. Na elementarnoj površini u uglu, ispod izvora toplote, za ($z = 0$ i $y = 0$) je: $T_{j,i+1} = T_{j,i-1}$ i $T_{j+1,i} = T_{j-1,i}$ i $Q_{j,i} = Q_{arc\ j,i} - Q_{con\ j,i} - Q_{rad\ j,i}$.
6. Na elementarnoj površini u uglu B ($z = 0$ i $y = w$) je $T_{j+1,i} = T_{j-1,i}$ i $T_{j,i+1} = T_{j,i-1}$, kao i $Q_{j,i} = -(Q_{con\ j,i} + Q_{rad\ j,i})$.
7. Na elementarnoj površini u uglu C, ($y = w$ i $z = d$) je: $T_{j+1,i} = T_{j-1,i}$ i $T_{j,i+1} = T_{j,i-1}$ kao i $Q_{j,i} = -(Q_{con\ j,i} + Q_{rad\ j,i})$.
8. Na elementarnoj površini u uglu D, ($y = 0$ i $z = d$) je: $T_{j+1,i} = T_{j-1,i}$ i $T_{j-1,i} = T_{j+1,i}$, kao i $Q_{j,i} = -(Q_{con\ j,i} + Q_{rad\ j,i})$.

$$T_{j,i}^* = T_{j,i} + \frac{\Delta t}{\rho * c} \left\{ Q_{j,i} + k_{j,i} * \left(\frac{T_{j-1,i} - 2 * T_{j,i} + T_{j+1,i}}{\Delta y^2} - \frac{T_{j,i-1} - 2 * T_{j,i} + T_{j,i+1}}{\Delta z^2} \right) + \frac{BM_{j,i}}{4} * \left[\frac{(T_{j+1,i} - T_{j-1,i})^2}{\Delta y^2} + \frac{(T_{j,i+1} - T_{j,i-1})^2}{\Delta z^2} \right] \right\} \quad (2)$$



Slika 2. Blok dijagram toka numeričkog proračuna temperaturnih polja

Tok proračuna temperaturnih polja pri zavarivanju čelika prikazan je na slici 2. Prvi korak pri radu sa modelom je

startovanje modela i unošenje podataka za proračun. Polazni podaci za proračun su: hemijski sastav čelika koji se zavaruje, dimenzija komada koji se zavaruje i parametri zavarivanja (napon u V, struja u A, brzina zavarivanja mm/s, postupak) koji se simuliraju. Na osnovu hemijskog sastava (mas. %) iz jednačina iz literature [17] se izračunavaju likvidus temperatura (T_l), odnosno solidus temperatura (T_s), koje definišu liniju razdvajanja oblasti metala šava i osnovnog, nerastopljenog metala. Oblast zavarenog spoja koja je pod uticajem termalnih promena koji dovode do strukturnih promena u osnovnom metalu (ZUT), definisana je kod većine konstrukcijskih čelika temperaturama transformacije A_{c1} i A_{c3} . I ove temperature izračunavane su na osnovu podataka iz literature [18]. U daljem toku proračuna, za svaku elementarnu površinu u poprečnom preseku zavarenog spoja definisanu položajem j i i , kao i vremenom t , izračunava se specifična toplota i toplotna provodljivost. U zavisnosti od položaja elementarnih površina primenjuje se jednačina (2) ili jednačine graničnih uslova, a prema toku proračuna prikazanom na slici 2. Nakon definisanog broja iteracija izračunate temperature se storiraju u memoriji računara, i to za svaku sekundu trajanja simulacije zavarivanja. Nakon ukupnog zadatog vremena simuliranja, odnosno postizanja uslova završetka simuliranja procesa zavarivanja, proračun se prekida. Kao rezultat proračuna dobijene su matrice sa vrednostima temperatura za svaku sekundu trajanja simulacije zavarivanja, a ukupan broj izračunatih pojedinačnih temperatura u sekundi simulacije definisan je brojem elementarnih površina na poprečnom preseku komada koji se zavaruje.

EKSPERIMENT

Provera i primena izloženog numeričkog modela proračuna temperaturnih polja u ZUT obavljena je kroz eksperimente



MAG zavarivanja i navarivanja čelika Nionikral 70 (NN70), iz grupe Ni-Cr-Mo niskolegiranih čelika visoke čvrstoće, toplo valjanog i poboljšanog stanja: kaljenje sa 890 °C u vodi i otpuštanje na 660 °C u trajanju od 540 s/mm, na zateznu čvrstoću 740 ÷ 940 MPa. Mikrostruktura u poboljšanom stanju je otpušteni niskougljenični martenzit, a indeks veličine austenitnog zrna, prema standardu JUS C.A3.004, iznosi 12 ÷ 13.

Eksperimenti MAG postupkom navarivanja vršeni su na pločama dimenzija 150 x 300 mm, debljine 6 mm, a zavarivanja, na pločama istih dimenzija, debljine 10 mm. Hemijski sastav korišćenih čelika dat je u tabeli 1. Oblik i

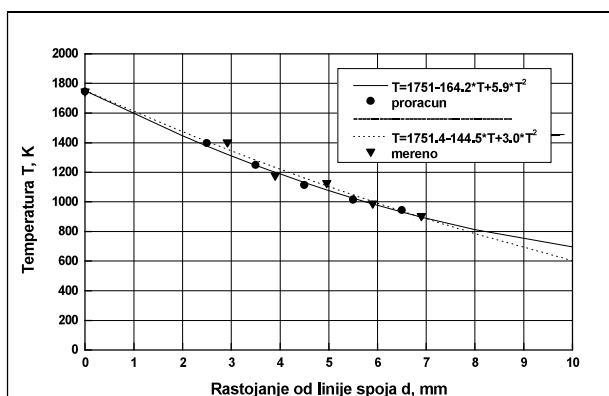
Tabela 1. Hemijski sastav (mas %)

Čelik Nionikral (NN70)	Postupak MAG	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Al	V	Mo
lim 6 mm	navarivanje	0.11	0.31	0.27	0.010	0.004	1.01	0.24	2.64	0.046	0.08	0.28
lim 10 mm	zavarivanje	0.11	0.28	0.24	0.010	0.006	1.01	0.15	2.64	0.02	0.08	0.25

REZULTATI I DISKUSIJA

Dobijeni rezultati proračunatih i merenih dimenzija ZUT, u zavisnosti od unesene količine toplote, prikazani su u tabeli 2. U tabeli su prikazana i merena i proračunata vremena hlađenja u oblasti 800 ÷ 500 °C, kao i odstupanja u % između proračunatih i merenih vrednosti. Na slici 3. prikazani su rezultati proračunatih i merenih maksimalnih temperatura u ZUT u zavisnosti od rastojanja od linije spoja, za zavareni uzorak označen brojem 3. Provera pouzdanosti numeričkog modela vršena je i za jednodimenzionalno navarivanje, i rezultati su prikazani u tabeli 3. Na slici 4. su prikazane linije spoja i linije ZUT dobijene merenjem i numeričkim proračunom za zavareni spoj i za navar.

Proračuni elektro-lučnog MAG zavarivanja po numeričkom modelu vršeni su sa dimenzijama poluosu elipsoida koji opisuje unetu količinu toplote: širina 5 mm, dubina 5 mm i dužina 10 mm.



Slika 3. Merene i numerički proračunate maksimalne temperature u ZUT u zavisnosti od rastojanja od linije spoja za slučaj zavarivanja uzorka 3

Dobijeni rezultati pokazuju da se odstupanje proračunatih od izmerenih vrednosti dimenzija ZUT kod zavarenih spojeva kreće od 4 % do 27 %, u proseku od oko 17 % za širinu ZUT, i oko 16 % za površinu ZUT.

Pouzdanost modela proverena za vrednosti brzine hlađenja u kritičnoj oblasti od 800 do 500 °C ($v_{8/5}$ tab.2), pokazuje da sa povećanjem unete količine toplote zavarivanja opada brzina hlađenja. Poređenje numerički proračunatih sa merenim vrednostima pokazuje razliku od 4 % do najviše 11 %, u

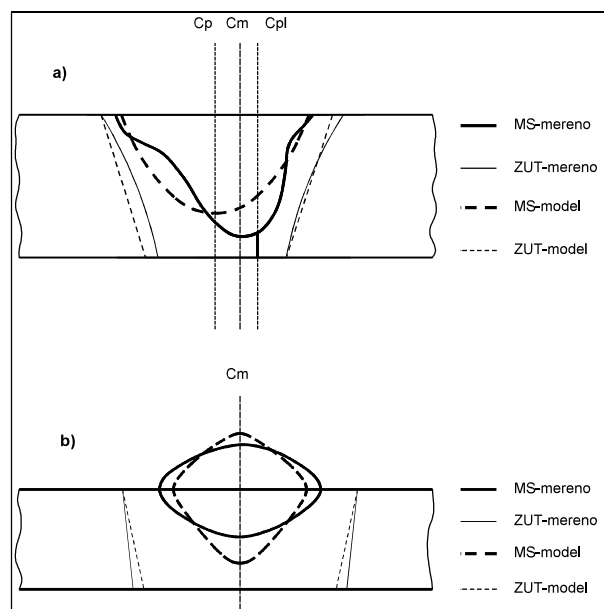
mere žljeba, kao i mesta merenja temperature prikazane su na slici 1.

Kao dodatni materijal korišćena je elektrodna žica VAC 60Ni, prečnika \varnothing 1.2 mm. Procesi navarivanja i zavarivanja vršeni su konstantnom brzinom. Kod navarivanja količinama unete toplote iznosila je od 0.4 do 1.4 kJ/mm, a kod zavarivanja 1.4 do 2.2 kJ/mm.

Protok zaštitnog CO₂ gasa iznosio je 6 dm³/min. Dimenzije zavarenih spojeva određivane su na metalografskim izbruscima poprečnog preseka pripremljenih klasičnim metodama, a uz primenu analize slike [15].

proseku 5.8 %. Rezultati pokazuju niske vrednosti odstupanja dimenzija i veliku osetljivost numeričkog modela na promenu energije zavarivanja koja se direktno odražava na površinske dimenzije spoja, kao i na brzinu hlađenja. Karakteristično je da su manja odstupanja kod izračunatih površina nego kod karakterističnih dimenzija šava, što ukazuje na bolju energetsku od konfigurativne simulacije prenosa toplote pri zavarivanju.

Rezultati merenja i numeričkog proračuna maksimalnih temperatura u poprečnom preseku zavarenog spoja, u zavisnosti od rastojanja od linije spoja, pokazuju visok stepen podudaranja (sl. 4). Razlika između merenih i numerički proračunatih dimenzija navara je od 1 % do 30 %, srednje vrednosti od 13 %, koja se može smatrati zadovoljavajućom.



Slika 4. Grafički prikaz merenih i proračunatih dimenzija zavarenih spojeva u poprečnom preseku ploča, a) zavareni spoj uzorak 3, b) navar uzorak 9, (C_m - osa simetrije merenih dimenzija, C_p - osa simetrije proračunatih dimenzija, C_{pl} - granična linija ploča)

Poređenje rezultata sa slike 4, gde su prikazane konture zavarenih spojeva, sa rezultatima dimenzija spojeva u tabeli 2 i 3, pokazuje da se rezultati proračuna relativno dobro slažu za dimenzije spoja, ali ne i za konfiguraciju spoja. To je bitno



ograničenje svih dosadašnjih modela koje proističe iz nepotpune simulacije gorenja električnog luka i nemogućnosti da se izrazi uticaj oblika žljeba na asimetričnost stuba električnog luka, i uticaja ove asimetričnosti na raspodelu energije u električnom luku. Kao što se na šematskom prikazu probnog spoja vidi, prva karakteristika koju ovaj računski model (pa i svi ostali do sada razvijeni numerički toplotni modeli) nije mogao da simulira, je asimetrična konfiguracija pre svega metala šava koji je omeđen linijom spoja. Ta asimetričnost se zatim prenosi i na dve sledeće

karakteristične linije: granicu između oblasti porasta i rafinacije zrna u ZUT, i granicu ZUT i osnovnog metala, koje svojim oblikom slede asimetričnost metala šava. Ova asimetričnost ima svoje ishodište u asimetričnom obliku metalne kupke, a koje opet svojim oblikom reflektuje raspodelu energije u električnom luku u toku zavarivanja u posmatranom preseku šava. Ova okolnost u prvi plan postavlja pitanje adekvatnog modeliranja raspodele unete toplote električnog luka u toku zavarivanja.

Tabela 2. Rezultati merenja i numeričke simulacije u zavisnosti od količine unete toplote pri eksperimentima MAG zavarivanja

Oznaka uzorka		1	2	3	4	5
količina toplote E (KJ/mm)		2.20	1.95	1.90	1.85	1.40
širina ZUT (mm)	mereno	5.80	4.50	4.90	3.60	3.50
površina ZUT (mm ²)		134.00	140.50	119.30	140.00	107.20
brzina hlađenja $v_{8/5}$ (°C/s)		7.80	8.80	8.80	8.40	12.50
širina ZUT' (mm)	model	4.40	3.60	3.60	3.50	3.10
površina ZUT' (mm ²)		124.00	114.00	106.00	101.00	93.00
brzina hlađenja $v_{8/5}'$ (°C/s)		7.50	8.30	8.80	9.30	13.60
širina ZUT' / ZUT (%)	otstupanje	-23	-21	-26	-4	-10
površina ZUT' / ZUT (%)		-7	-19	-11	-27	-13
brzina hlađenja $v_{8/5}' / v_{8/5}$		-4	-5	0	11	9

Primedba: Otstupanje = $100 \cdot (\text{proračunata vrednost} - \text{merena vrednost}) / \text{merena vrednost}$

Tabela 3. Rezultati merenja i numeričke simulacije u zavisnosti od količine unete toplote pri eksperimentima MAG navarivanja

Oznaka uzorka		6	7	8	9	10
količina toplote E (KJ/mm)		0.4	0.6	0.9	1.1	1.4
širina MS (mm)	mereno	5.7	7.4	10.3	11.2	13.7
širina ZUT (mm)		7.6	10.0	15.0	16.3	20.4
površina MS (mm ²)		14.5	18.7	26.1	32.2	39.7
površina ZUT (mm ²)		12.7	33.5	73.3	84.5	109.1
širina MS' (mm)	model	5.9	6.4	8.2	9.3	12.0
širina ZUT' (mm)		8.8	9.6	13.7	16.2	19.7
površina MS' (mm ²)		11.0	13.0	24.0	30.0	50.0
površina ZUT' (mm ²)		15.0	41.0	65.0	73.0	102.0
širina MS'/SMS (%)	otstupanje	3	-13	-20	-17	-12
širina ZUT' / ZUT (%)		16	-4	-9	-1	-3
površina MS' / MS (%)		-24	-30	-8	2	26
površina ZUT' / ZUT (%)		18	22	-11	-14	-6

Primedba: Otstupanje = $100 \cdot (\text{proračunata vrednost} - \text{merena vrednost}) / \text{merena vrednost}$

Zbog nepostojanja bilo kakvih fizičkih relacija između električnih parametara gorenja luka, gabarita - oblika žljeba i asimetričnog oblika kupatila, u ovom radu se odustalo od numeričke simulacije konfiguracije asimetričnosti spoja, već su ciljevi modeliranja prenosa toplote ograničeni na adekvatnu energetsku simulaciju u okvirima proračuna simetrično formiranog spoja.

Uspešna simulacija konfiguracije zona zavarenog spoja, uključujući i asimetriju, zahteva postojanje baze podataka o uticajnim faktorima na geometriju i energetske karakteristike električnog luka, i na njima zasnovane dalje modifikacije matematičkog opisa izvora toplote - električnog luka.

Na osnovu izloženih rezultata, uopšteno se može zaključiti da niske vrednosti otstupanja numerički proračunatih i merenih dimenzija spoja, kao i brzine hlađenja, pokazuju visoke mogućnosti i pouzdanost numeričkog modela u simulaciji procesa zavarivanja MAG postupkom.

U daljem radu usavršavanje modela trebalo bi usmeriti na poboljšanje simulacije konfiguracije zavarenih spojeva, umanjnjem uticaja faktora koji nisu bili kontrolisani proračunom, odnosno nisu bili mereni, već su korišćeni podaci iz literature za čelike slične ispitivanim, a to su: specifične toplote, koeficijenti prenosa toplote, koeficijenti iskorišćenja postupka zavarivanja i dr. Rešenje može da bude merenje pomenutih veličina ili pronalaženje i korišćenje baze podataka sa vrednostima za čelike za koje se vrši simulacija, kao i za primenjene postupke.

Uspešnim modeliranjem termalnog ciklusa u ZUT, moguće je predvideti i metalurško transformaciono ponašanje metala, odnosno vrstu i udeo nastalih struktura u toj kritičnoj oblasti zavarenog spoja. Predviđanje strukture na osnovu prethodno izračunate termalne istorije, povezivanjem proračunatih podataka sa bazom podataka koja sadrži dijagrame kontinuiranog hlađenja (KH) za razmatrane čelike, može pružiti informacije o toku transformacija i o nastalim strukturama pri kontinuiranom hlađenju. Ovi dijagrami mogu



sadržati i podatke kao što je tvrdoća i/ili rad udara pojedinih struktura, čime se pruža mogućnost predviđanja osobina zavarenog spoja, kao i predviđanje kritičnih mesta u zavarenom spoju, čime se dobijaju dragoceni podaci, kako za projektovanje, tako i za kvalitativnu kontrolu zavarenog spoja.

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata proračuna i eksperimentalnih istraživanja proizilaze sledeći zaključci:

- Razvijen je dvodimenzioni kvazistacionarni numerički model prenosa toplote pri zavarivanju. Model se zasniva na proračunu toplotnog bilansa, a parcijalne diferencijalne jednačine koje opisuju prenos toplote rešavane su metodom konačnih razlika. Kao rezultat numeričkog proračuna dobijeno je polje temperatura u zavarenom spoju u zavisnosti od vremena.

LITERATURA

- [1] Cerjak H. H., Buchmayr B.: Remarks on the Numerical analysis of weldability, (1995), ISIJ International, 10/1995, 1157-1161.
- [2] Tsao K.C., Wu C. S.: Fluid flow and heat transfer in GMA weld pools, (1988), Welding research supplement, 3/1988, 70s-75s.
- [3] Rosenthal D.: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, (1941), Welding Journal, 5/1941, 220s-243s.
- [4] Rikalín N.: Toplovi osnovi svarke, Akademii Nauk SSSR, Moskva, 1947.
- [5] Pavelić V.: Experimental and computed temperature histories in GTAW of thin plates, (1969), Welding research supplement, 7/1969, 295s-305s.
- [6] Grill A.: Effect of arc oscillations on the temperature distribution in GTA tantalum welds, (1981), Metallurgical transactions B, 12B/1981, 667-674.
- [7] Kou S, Le Y.: Three dimensional heat flow during GTA welding of aluminium plates, (1983), Metallurgical Transactions A, 14A/1983, 2245-2253.
- [8] Friedman E.: Thermomechanical analysis of the welding process using the FEM, (1975), Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 8/1975, 206-213.
- [9] Krutz G. W., Segerlind L. J.: Finite element analysis of welded structures, (1978), Welding research supplement, 7/1978, 211s-216s.

- Model je proveren i potvrđen kroz eksperimente zavarivanja i navarivanja čelika Nionikral 70, MAG postupkom. Potvrda numeričkog modela prenosa toplote zasnivala se na poređenju numerički proračunatih sa izmerenim dimenzijama zavarenih spojeva, kao i sa brzinama hlađenja i temperaturama koje su merene za zavarene spojeve.

- Dobijeni rezultati pokazuju zadovoljavajuću tačnost numeričkog modela koja je potvrđena poređenjem sa predviđenim i izmerenim brzinama hlađenja i dimenzijama ZUT. Odstupanje proračunatih brzina hlađenja kod MAG zavarivanja iznosi prosečno 6 % u odnosu na izmerena, a proračunate dimenzije ZUT odstupaju od izmerenih u proseku za 14 %, ako se uzmu u obzir sve izvršene simulacije. Izloženi numerički model je dobra osnova za razvijanje modela predviđanja struktura i osobina u ZUT.

- [10] Goldak J.: New FE model for welding heat sources, (1984), Metallurgical transactions B, 15B/1984, 299-305.
- [11] Kumar S, Bhaduri S. C.: Three dimensional FE modeling of GMA welding, (1994), Metallurgical and materials transactions B, 25B/1994, 435-441.
- [12] Ushio M., Wu C. S.: Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow, (1997), Metallurgical and materials transactions B, 28B/1997, 509-516.
- [13] Yang Z., Debroy T.: Modeling macro and microstructure of GMAW HSLA - 100 steel, (1999), Metallurgical and materials transactions B, (1999), 30B/1999, 483-493.
- [14] Brimacombe J.K.: Mathematical and Physical Modeling of Met. Proc. Operations, (1980), HPC, Washington, 1980, 1-20.
- [15] Odanović Z.: Numeričko modeliranje toplotnog režima procesa elektrolučnog zavarivanja čelika i predviđanje mogućih efekata na zonu uticaja toplote, (1993), Doktorska disertacija, TMF, 1993. Beograd
- [16] Touloukian Y.S.: Specific Heat - Metallic Elements and Alloys, (1970), Thermophysical Properties of Matter, Vol. 4, IFI/Plenum, New York, 1970.
- [17] Kowakami K.: Niponkoku Technical Report, (1982), No. 36, 1982. 26.
- [18] Atkins M.: Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels, (1977), British Steel Corporation, Sheffield 1977.



3. Međunarodno naučno-stručno savjetovanje ZAVARIVANJE SPAJA „ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2025.“

Mostar, 22.-24.10.2025. godine.

TREĆI POZIV

3. MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNO SAVJETOVANJE „ZAVARIVANJE SPAJA“ „ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2025.“

Mostar, 22.-24.10.2025. godine.

NAPOMENA: Zbog nepredviđenih organizacionih okolnosti došlo je do izmjene datuma održavanja savjetovanja sa 15.-17.10. na **22.-24.10.2025. godine.**

TEME

- 1 - Konvencionalne i nove tehnologije zavarivanja
- 2 - Robotizacija i automatizacija
- 3 - Izrada zavarenih konstrukcija
- 4 - Integritet konstrukcija i osiguranje kvaliteta
- 5 - Zahtjevi i primjena standarda EN 1090 i EN ISO 3834
- 6 - Pouzdanost i sigurnost zavarenih proizvoda i konstrukcija
- 7 - Zavarljivost materijala i metalurgija
- 8 - Osnovni, dodatni i pomoćni materijali
- 9 - Oprema za zavarivanje i srodne postupke
- 10 - Tehničke regulative, obrazovanje, ekologija i zaštita



VAŽNI DATUMI

- | | |
|---------------------|--------------------------------------|
| 20. septembar 2025. | Prijava sažetaka |
| 25. septembar 2025. | Obavijest o prihvatanju sažetka |
| 10. oktobar 2025. | Rok za dostavu radova |
| 15. oktobar 2025. | Obavještenje o prihvatanju radova |
| 17. oktobar 2025. | Rok za prijavu učesnika konferencije |

KONTAKT

BH Društvo za zavarivanje
Bosne Srebrene br. 6, 75000 Tuzla
bhdz.info@gmail.com
inz@bih.net.ba

DATUM I MJESTO ODRŽAVANJA

22. do 24. oktobar 2025. Hotel Mostar, ulica Kneza Domagoja, 88000 Mostar

Preliminarni program savjetovanja:

- | | |
|-------------|--|
| 22.10.2025. | Prijava učesnika i koktel dobrodošlice |
| 23.10.2025. | Radni dan, otvaranje konferencije, izlaganje radova, prezentacije sponzora, svečana večera |
| 24.10.2025. | Izlet - tura Mostar - Počitelj - Blagaj / Buna - Mostar, ručak |

KOTIZACIJA

Kotizacija za učesće u cjelokupnom Programu savjetovanja iznosi 400 KM, odnosno protuvrijednost u eurima prema važećom kursu na dan uplate.

Mostar, 22.-24. oktobra 2025.



Aleksandar Sedmak ^{1,a}

DIRECT MEASUREMENT OF J INTEGRAL – A RETROSPECTIVE

DIREKTNO MERENJE J INTEGRALA – RETROSPEKTIVA

Review article / Pregledni rad

Paper received / Rad primljen:

August 2025.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

September 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia

email / ORCID ID :

^a aleksandarsedmak@gmail.com / 0000-0002-5438-1895

Keywords: J integral, pressure vessel integrity assessment

Ključne reči: J integral, procena integriteta posuda pod pritiskom

Abstract

Direct measurement of J integral has been presented as a retrospective of more than 40 years of experience. Early efforts and experiments on welded wide plates and pressure vessels are presented and analysed in respect to the effect of material heterogeneity. Physical meaning of the J integral values obtained by direct measurements on a pressure vessel is explained to clarify its application. Different boundary conditions are also considered, to investigate options for simplified measurements. The possibility of applying simplified direct measurement of J integral for pressure vessel integrity assessment has been considered. Finally, it is noted that the measurement of strains by digital image correlation instead of strain gauges can make a new life of this technique.

Rezime

Direktno merenje J integrala predstavljeno je kao retrospektiva iskustva dužeg od 40 godina. Predstavljene su i analizirani rani naponi i eksperimenti na zavarenim širokim pločama i posudama pod pritiskom, u odnosu na uticaj heterogenosti materijala. Objašnjeno je fizičko značenje vrednosti J integrala dobijenih direktnim merenjima na posudi pod pritiskom kako bi se razjasnila njegova primena. Razmatrani su i različiti granični uslovi, kako bi se istražile opcije za pojednostavljena merenja, kao i mogućnost primene pojednostavljenog direktnog merenja J integrala za procenu integriteta posuda pod pritiskom. Na kraju, primećeno je da merenje deformacija pomoću digitalne korelacije slike umesto mernih traka može udahnuti novi život ovoj tehnici.



PROLOGUE – the role of Prof. Dr. Stojan Sedmak

Welding is an exceptional discipline because it is both a "hard" science and sophisticated skill. Serious scientists deal with the first aspect, and experienced welders are irreplaceable for the second, and together they form a team that guarantees the integrity of welded joints and structures. However, there always remains the problem of cracks as an inevitable nightmare of more complex materials and geometries. In other words, fracture mechanics of welded joints is always actual topic, the very mention of which immediately brings to mind the great man of the Serbian and Yugoslav welding scene - Stojan Sedmak. Therefore, this paper is dedicated to him, as one of the five legends of fracture mechanics. Let us briefly remember other four: Mladen Berković (computational mechanics), Aleksandar Radović (welding), Tihoslav Tošić, whose "YES, we will build Reversible Hydro Power Plant Bajina Bašta", when he was the general manager of GOSA, is directly and to the greatest extent responsible for the development of fracture mechanics of welded joints in our country. Finally, Branko Žeželj, who pushed the limits of building with prestressed concrete, so that the dome of hall 1 of the Belgrade Fair is still the "world champion" in the range of freely supported construction, according to Guinness records.

This paper is a retrospective of one significant topic which was in Stojan's focus for decades, and can serve at the same time as an excellent example to illustrate gigantic efforts of the man who positioned Serbia in a high place in Europe and the world in the field of fracture mechanics of welded joints. As proof of that claim, let's cite just a few facts:

- Stojan's successors are the President of European Structural Integrity Society (ESIS), and has been one of directors of the International Institute of Welding (the only one ever from exYu) until recently.
- The ESIS TC18 is dedicated to the memory of Prof. Stojan Sedmak, "who strongly contributed to ESIS", and delivers the award every two years to scientists that have strongly contributed to the structural integrity of welded structures.
- The 22nd European Conference on Fracture, was organized in Belgrade in 2018 with over 500 participants.

- This November, the first European-Chinese conference on structural integrity will be held in Belgrade.
- Journal "Structural Integrity and Life", established by him in 2001, has reached M22 rank in Ministry of Science classification.

In the text that follows, the works related to the direct measurement of the J integral will be briefly presented, with an emphasis on the application to pressure vessels, as an original contribution of our researchers under the leadership of Stojan Sedmak. This overview will be followed by some new interpretations of the old results.

1. Introduction

Direct measurement of J integral was introduced by Dave Read [1] back in eighties as a new option to evaluate J integral on wide plates, including welded joints. Main idea was to express J integral by strains, which were measured along wide plate outer paths, and by CMOD, which was measured at the same time during tensile loading. Namely, starting from the definition of J integral

$$J = \int_{\Gamma} W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \quad (1)$$

where x and y represent Cartesian coordinates with an origin at the tip of an edge crack, Fig. 1, W is the strain work density, \vec{T} is the tension vector on contour Γ (ABCD in Fig. 1), \vec{u} is the displacement vector. The stress-strain curve representing the elastic-ideally plastic material behaviour is given in Fig. 2. Two integrand expressions in Eq. (1), i.e. the strain energy member Wdy and tensile-bending member $\vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds$ are calculated for contour segments AB, CD and BC as follows.

The strain work density $W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$, where σ_{ij} is the stress tensor and ε_{ij} is the strain tensor. For the plane stress state one gets: $\sigma_{zz} = 0$, $\sigma_{yz} = 0$, $\sigma_{zx} = 0$, hence $W = \int \sigma_{xx} d\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} d\varepsilon_{yy} + \sigma_{xy} d\varepsilon_{xy}$ i.e., for contour segments AB and CD, $W = \int \sigma_{yy} d\varepsilon_{yy}$, since stress tensor components along the free surface are all equal to zero, except σ_{yy} .

Tensile force \vec{T} equals zero along the contour segments AB and CD, since they are located at free surfaces, hence the second member in the J integral expression equals zero for these segments.



On segment BC, $dy = 0$, since this segment is parallel to the x axis, hence the first member equals zero for this segment. Tensile force \vec{T} is calculated as: $T_i = \sigma_{ij}n_j$ where n_j is the unit vector along the outer normal to the contour Γ . Taking plane stress state into account: $T_x = \sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y$; $T_y = \sigma_{yx}n_x + \sigma_{yy}n_y$. Along segment BC, $n_y = 1$, and $n_x = 0$, so: $T_x = \sigma_{xy}$, $T_y = \sigma_{yy}$.

Shear component σ_{xy} can be neglected since the chosen contour segment is parallel to the x axis and at a sufficient distance from the crack. Component u_x of the displacement vector \vec{u} along segment BC can also be neglected, since there is no displacement in that direction. Hence the first integrand member in J integral for the contour segment BC is reduced to the product of the tensile force \vec{T} and the change in displacement vector \vec{u} along the x axis. Tensile component T_y is obtained from strain, measured using strain gauges at points B and C, Fig. 1, since all stress components except σ_{yy} can be neglected along the segment BC. Bending member $\partial u_y / \partial x$ along segment BC can be expressed as:

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{u_y(C) - u_y(B)}{x(C) - x(B)} \quad (2)$$

where displacements $u_y(C)$ and $u_y(B)$ at points C and B are measured using a linear variable differential transformer (LVDT). Variables $x(C)$ and

$x(B)$ represent coordinates at points C and B, and the difference between them, $x(C) - x(B)$, represents the specimen thickness. Strain ϵ_{yy} is obtained from strain gauges, which are set according to Fig. 3. These values of strain for calculating the work density W are limited to a finite number of locations along segments AB and CD, hence the value of the J integral is an approximation.

Calculation of tensile-bending member, J_{BC} , is reduced to multiplying $T_y (\approx \sigma_{yy})$ with $u(C) - u(B)$, since $ds = dx$. By using numerical integration, it is possible to determine the values of displacements $u_y(C)$ and $u_y(B)$ via strain distribution, using the following expressions:

$$u_y(C) = \int_D^C \epsilon_{yy} dy \quad \text{and} \quad u_y(B) = \int_A^B \epsilon_{yy} dy + \frac{CMOD}{2}$$

where CMOD is the crack mouth opening displacement, measured using a special gauge, Fig. 1b.

Direct numerical integration is used for calculating members in Eq.(1), since segments DC and AB are divided into smaller segments, each containing a single strain gauge. Each segment contribution is taken into account as the product of strain energy density, calculated from the measured strain from Eq. (2), and segment length. Thus, members J_{AB} , J_{BC} and J_{CD} are then added in the following way: $J = 2(J_{AB} + J_{CD} + J_{BC})$

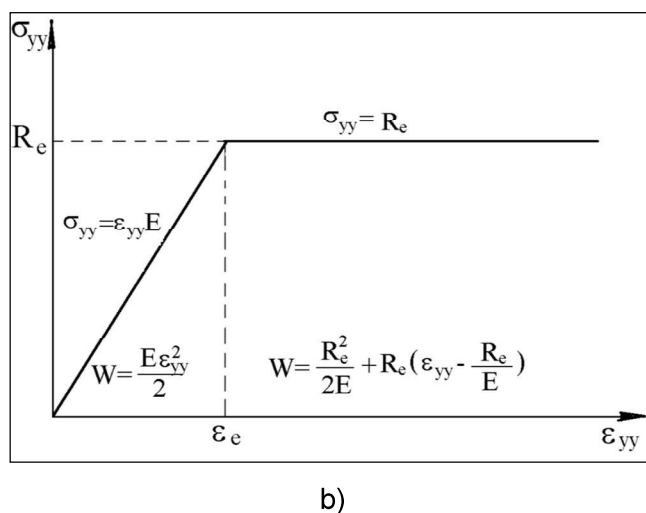
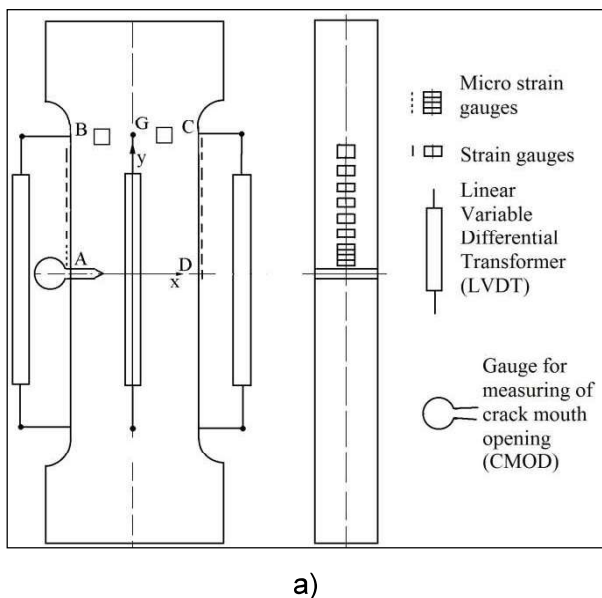


Figure 1. a) Instrumentation for tension tests of the edge cracked specimen, b) stress-strain curve, [2]

Slika 1. a) Oprema za ispitivanje zatezanjem uzorka sa ivičnim prslinama, b) kriva napon - deformacija, [2]



2. Literature overview

To start with, wide plates made with mismatched welded joints were tested to prove fitness-for-purpose of the large penstock in reversible HPP BB, as described in details in [3-5]. Basic concept was to compare J-R curves, obtained by direct measurement of J integral, with crack driving forces (CDF), obtained numerically for different crack lengths and pressure levels in a cylindrical pipe. To verify numerical model for CDF, the special technique was used to measure J integral directly on a cylindrical pressure vessel, as described in [6,7]. This issue is the main focus of this paper, as well.

Later on, direct measurement was used to test wide plates with undermatched and overmatched welded joints, as described in [2,8]. Toward this aim, J integral components SW and St were presented separately, to follow more precisely mismatching effects. Also, the effect of boundary conditions was analysed in [2,8] and will be discussed here as well.

Direct measurement of J integral, as a technique for material testing, was also presented at the International Conference on Computerization in Welding Info IV, [9], once it was recognized also as data collection and management process.

Both wide plates and cylindrical pressure vessel, were used in another experiment, performed in Skopje in late eighties, as a part of doctoral thesis of Todor Adziev, [10,11]. Focus of this experiment was on the effect of welding residual stresses and geometry imperfections on crack resistance. These effects were shown to be stronger than expected.

Yet another set of experiments with welded wide plates was performed afterwards in Skopje in the scope of D.Sc. thesis of Gorgi Adziev, with the main focus to assess structural integrity of a large spherical tank made of HSLA steel, [12,13]. Directly measured J integral values were used as J-R curves to find the critical point on corresponding CDF and thus the pressure which would lead to failure after elastic-plastic deformation of a welded joint.

In the meantime, similar experiment with pressure vessel was performed in Belgrade, in the scope of D.Sc. thesis of Mohamed Essamei, [14,15] with the focus on residual stresses. At the same time, detailed theoretical analysis of the method itself was performed to evaluate the effect of biaxial stress state and strengthening of material in plasticity, [2,16,17]. It was shown that these

effects are not important in the case of cylindrical vessels, but would be of utmost importance in the case of spherical vessel. The effect of material strengthening was not significant, as well, [2].

3. Effect of welded joint matching on crack behavior in welded joints

Heterogeneity of tensile properties has an important role in the behavior of welded joints, particularly if stress concentration caused by geometrical imperfections, such as angular distortion or misalignment, produce local plastic strains. To assess this effect tensile panels with surface cracks were made of Sumiten steel SM 80P and SM60 for three different matching levels of welded joints made by SAW:

1. Overmatching (SM 60 steel + US 80B wire);
2. Undermatching (SM 80P steel + US 49 wire);
3. Normal matching (SM 80P steel + US 80B wire), designed also as an undermatched joint.

These three matching levels were designed in accordance of the usual welding practice for steels above 700 MPa yield strength, which recommends undermatched welded joints to avoid problem with cold cracking.

In addition to tensile panels, three-point bend (3PB) specimens were made with cracks in parent metal (PM) and weld metal (WM), Fig. 2, so that non-standard specimen can be compared with the standard ones.

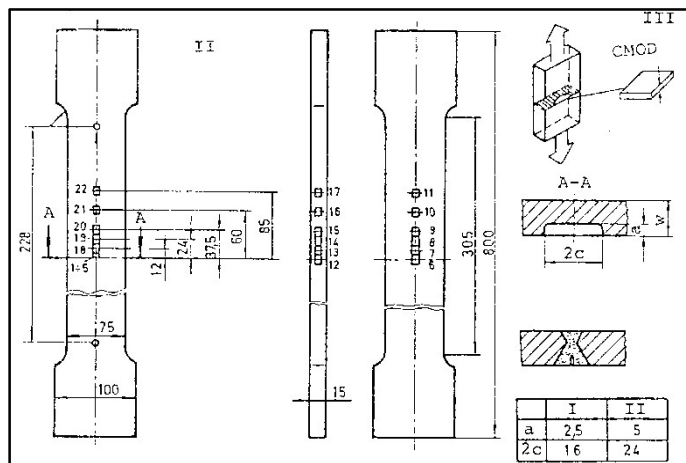


Figure 2. Pre-cracked specimens (I – 3PB; II - tensile panel, III - details of surface cracks on tensile panels)

Slika 2. Epruvete sa prslinama (I – 3PB; II - zatezna ploča, III - detalji površinskih prslina na zateznim pločama)

The J-R curves for PM SM 80P and for differently matched weld metals are shown in Fig. 3. The slope of J-R curve for SM 80P steel indicates high resistance to crack growth (Fig. 3.I), even with crack ratio $a/W=0.61$. As expected, cases crack growth resistance of WM is lower compared to PM, Fig. 3.II-IV. One can also notice satisfactory agreement of results for tensile panels (PTSC) and

three-point bend (3PB) specimens, verifying use of tensile panels. In addition, one can notice that 3PB specimens produce more conservative results, as expected. Nevertheless, keeping in mind that the stress state in a cylindrical pressure vessel corresponds better to tension than to bending, the use of J-R curves obtained by tensile panels is verified.

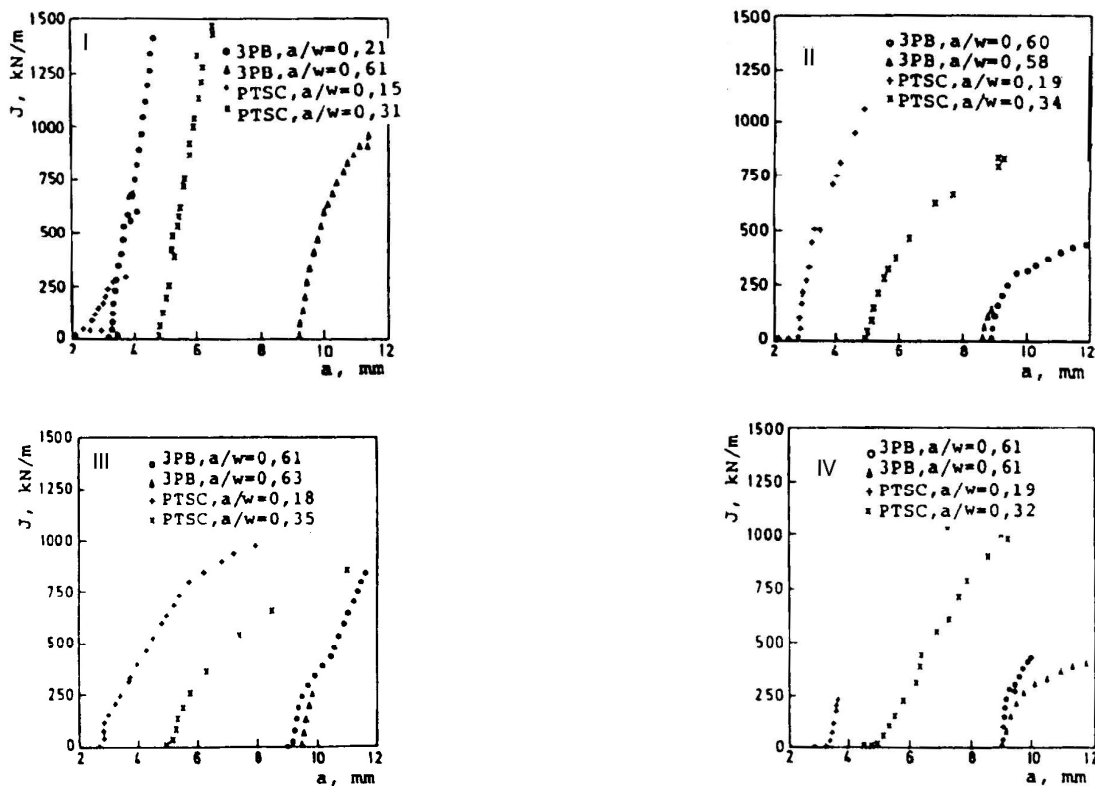


Figure 3. J-R curves (I - base metal; II - normal matched welded joint - SM 80P steel; III - undermatched welded joint - SM 80P steel; IV - overmatched welded joint - SM 60 steel)

Slika 3. J-R krive (I - osnovni metal; II - zavareni spoj jednake čvrstoće - čelik SM 80P; III - zavareni spoj niže čvrstoće - čelik SM 80P; IV - zavareni spoj povišene čvrstoće - čelik SM 60)



Experimental pressure vessel (Fig. 4.I), made of SM80P steel 16 mm thick plates, with fatigue pre-crack, positioned in a sample of SAW weld metal, was used for J integral direct measurement (Fig. 4.II). Fatigue pre-crack in WM center was produced in the segment (180x380 mm), cut out and re-welded to the pressure vessel. The instrumentation

for direct measurement of J integral around selected contour DCBAB'C'D", Fig. 4.III, consisted of strain gauges, Fig. 4.IV, and CMOD clip gauge. During the experiment crack grew into length, from initial value $2c = 64.25$ mm to the final value $2c = 80$ mm, with depth remaining constant, $a = 11$ mm, Fig. 4.II.

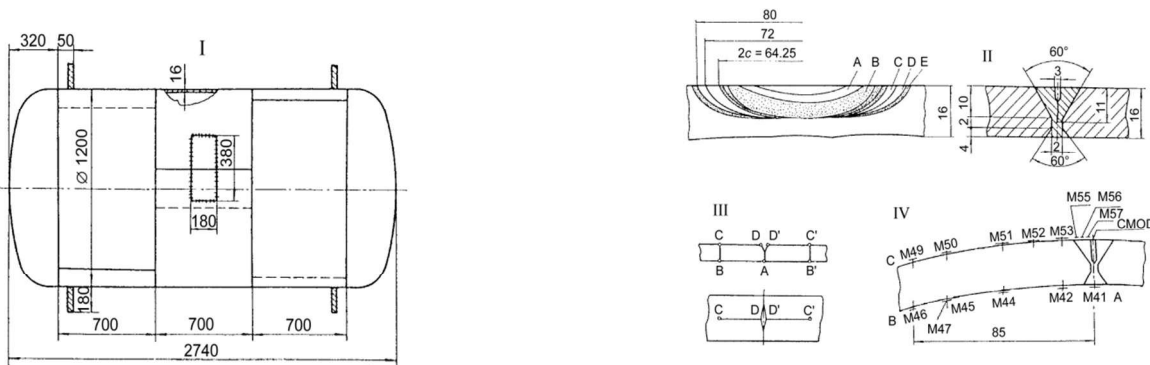


Figure 4. Experimental pressure vessel: I Shape and dimensions. II Details of the crack (A notch; B fatigue pre-crack; C, D stable crack growth during testing; E final fatigue crack). III Integration contour. IV Distribution of strain gauges

Slika 4. Eksperimentalna posuda pod pritiskom: I Oblik i dimenzije. II Detalji prsline (A zarez; B zamorna pre-prslina; C, D stabilan rast prsline tokom testiranja; E konačna zamorna prslina). III Kontura integracije. IV Raspodela mernih traka

For the crack length $2c = 64.25$ mm, vessel diameter $2R = 1184$ mm, wall thickness $W = 16$ mm, and Poisson's ratio $\nu = 0.3$, the shell parameter λ used for definition of CDF values for investigated pressure vessel, is:

taken as 585 MPa, [19]. One should notice that CDF values are obtained for the fixed values of crack length, $2c = 64,25$ mm, and depth, $a = 11$ mm. At the same time, using J integral direct measurement, it was possible to obtain the point "A" at the pressure 100 bar, expressed in the same non-dimensional form ($\sqrt{J^*} = 0,95$), Fig. 5. Corresponding value of CDF, calculated by REI model, is lower 33% (0.63). This difference can be attributed to the fact that crack has grown into length, making this comparison questionable, since REI model is valid for fixed crack dimensions. Taking crack growth into account, this difference is reasonable.

$$\lambda = \left[12(1-\nu^2) \right]^{1/4} \frac{c}{\sqrt{R \cdot W}} = \left[12(1-0.3^2) \right]^{1/4} \frac{32.125}{\sqrt{1184 \cdot 0.016}}$$

Crack driving force for an axial surface crack have been calculated by REI model, [18], for $\lambda = 0.6$, expressed in non-dimensional form ($\sqrt{J^*} = \sqrt{J \cdot E / 4aR_{p0.2}}$) and plotted as set of lines in Fig. 5, for different crack ratios a/W and different normalized pressures $p \cdot R / W \cdot R_{p0.2}$. Thereby, $R_{p0.2}$ is

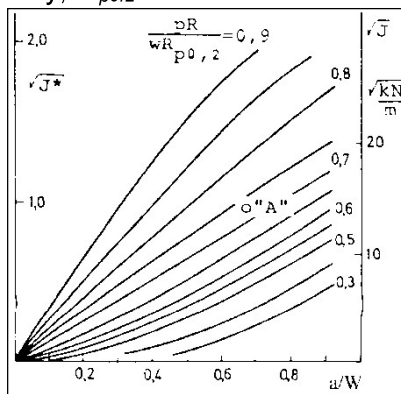


Figure 5. Crack Driving Forces vs. crack depth

Slika 5. Zavisnost sila rasta prsline od dubine prsline



4. Discussion

There are two questions that remained unanswered after all these experiments with direct measurements of J integral. The first one is the physical meaning of point "A" (Fig. 5) and the second one the practical use. Here, we will try to provide the answers.

Regrading point A, as already mentioned, the idea was to verify REI model for CDF calculation, which is mathematical fiction since the curves representing CDF are just a collection of points obtained for fixed crack dimensions and different pressure levels. Namely, if one follows any of CDF curves for the fixed pressure, they are just the collection of points for different crack length and by no means dependence of CDF on crack length during its growth. Therefore, crack growth during pressurizing up to 100 bar makes comparison of point A with such a mathematical fiction questionable. On the other hand, if one gets all sets of points representing J integral vs. crack length, that is practically J-R curve. If it is done with standard specimen, such a curve represents material resistance to crack growth and can be used in combination with CDFs to evaluate critical pressure values, as done and shown in number of references [xx]. Although J integral values were not recorded and neither was the crack length, it is obvious that point A is just one point in non-recorded J-R curve. But than again, let us emphasize that point A and non-recorded J-R curve would not be a measure of material crack resistance, but rather a measure of pressure vessel crack resistance. In other words, if J integral is directly measured on a full-scale pressure vessel, then its critical value simply corresponds to the leakage pressure (if dominant crack growth is into depth) or the pressure when catastrophic failure occurs (dominant crack growth into length). No need for CDFs and material J-R curves in that case.

To answer the second question, i.e. the practical use of direct measurement of J integral, the way is to start from the fact that its complexity prevented its applicability. Also, knowing strict regulations in respect to pressure vessel exploitation, with crack-

like defects and unacceptable, it is not likely that such a problem occurs in practice. Yet, real life is often intriguing. In this experience of these authors, there were a couple of issues with crack-like defects in pressure vessel welded joints which could not be repaired and replacement of the vessel was hardly an option. Fortunately, conservative, linear elastic fracture mechanics analysis proved that the vessel integrity was not jeopardized. If that was not the case, elastic-plastic fracture mechanics analysis, based on J integral would have been another option. Well, certainly not in the way as described here., leading us to try to find an alternative. And that is how the boundary conditions became an issue.

To elaborate this issue let us quote part of paper [2], reflecting Fixed point- and four-point bending – modification of boundary conditions: "If the ends of the plate are in the jaws of the testing machine so that they cannot rotate, then the boundary conditions change, or the tension-bending member becomes zero". Just to mention - in the original Read's paper there was a pin, [1]. This simple fact has not been noticed in the works dealing with such investigations, e.g. [20]. The situation is similar for pressure vessels, but in that case there is still a possibility for (small) rotation of loaded ends. Nevertheless, as a reasonable approximation, one can neglect such a small rotation. In that case, the J integral reduces to a difference of deformation energies at the smooth side and at the side of the crack, and CMOD measurement is not necessary. In practical terms, this means that all one needs to know is strain distribution on the outer side of a PV since the crack-like defects are typically on the inner side or somewhere along thickness, while strain energy from the inner side can be estimated even analytically, not to mention the finite element method.

From practical point of view, one should also keep in mind use of DIC for strain measurement instead of SGs, including the standard proof testing of a pressure vessel suspected to presence of crack-like defects from the inner side or along wall thickness.



5. Conclusions

Base on presented results and discussion following can be concluded:

- Direct measurement of J integral is powerful tool to assess material crack resistance and even the structural integrity of a component like pressure vessel
- This technique can be simplified in the case of clamped specimens and pressure vessels due to boundary conditions and may be reduced just to a measurement of strain distribution in the area opposite from the crack-like defect
- Using of DIC instead of SGs could mean new life for this simple technique.

References / Literatura

- [1] D. T. Read, (2013): Experimental method for direct evaluation of the J contour integral, ASTM STP 791, 199-213, 1983.
- [2] Z. Radaković, M. Abukhres, A. Sedmak, I. Ivanović, B. Petrovski, Direct measurement of the J integral on a pressure vessel, Structural Integrity and Life, 13(3), 163-169
- [3] B. Božić, S. Sedmak, B. Petrovski, A. Sedmak, (1989), Crack growth resistance of weldment constituents in a real structure, Bulletin T. Cl de l'Academie serbe des Sciences at des Arts, Classe des Sciences techniques, No 25, Beograd, 21-24
- [4] S.Sedmak, B.Petrovski, A.Sedmak, (1992): The Resistance to Crack Growth of Different Regions of Weldments in a Real Structure, Int. J. Pres. Ves. & Piping 52, 313-335
- [5] S. Sedmak and A. Sedmak, (2005): Integrity of Penstock of Hydroelectric Powerplant, Structural Integrity and Life, 5(2), 59-71
- [6] S.Sedmak, B.Petrovski, (1988) : Application of direct measurement of J integral on a pressure vessel with axial crack, ASTM STP 945, ASTM, Philadelphia, USA, 730-740
- [7] S.Sedmak, T.Adžiev, B.Petrovski, A.Sedmak, (1989): J integral as a measure of crack driving force in full-scale pressure vessel test, Proc. of ICF 7, Houston, , 447-454

5. Zaključci

Na osnovu prikazanih rezultata i diskusije, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Direktno merenje J integrala je moćan alat za procenu otpornosti materijala na širenje prslina, pa čak i za procenu strukturalnog integriteta komponente kao što je posuda pod pritiskom.
- Ova tehnika se može pojednostaviti u slučaju uklještenih epruveta i posuda pod pritiskom zbog graničnih uslova, a može se svesti samo na merenje raspodele deformacija u oblasti nasuprot defektu nalik prslini.
- Upotreba DIC (digitalne korelacije slike) umesto SG (mernih traka) može udahnuti novi život ovoj jednostavnoj tehnici.

[8] B.Petrovski, M.Kocak, S.Sedmak, (1993): Fracture Behavior of undermatched weld joint with short surface crack, GKSS 91/E/93

[9] S.Sedmak, T.Adžiev, J.Gočev, A.Sedmak,(1992): Computerized test for J integral measurement on welded panels, Proc. Int. Conf. on Computerization of Welding Info IV, AWS, Orlando, 161

[10] T.Adžiev, S.Sedmak, (1989): Uticaj zaostalih napona na otpornost zavarenih posuda pod pritiskom prema razvoju prslina, Zavarivač 3-4/89, 53

[11] T.Adžiev,(1986): Residual strength of a cylindrical pressure vessels with a crack, D.Sc. thesis (in Macedonian), Faculty of Mechanical Engineering, University of Skopje

[12] G. Adžiev, A. Sedmak, (2003): Integrity assessment of spherical storage tank, Structural Integrity and Life, 3(2), 93-98

[13] G. Adžiev,(2003): The effect of mismatching on the integrity of welded structure with a crack, D.Sc. thesis (in Macedonian), Faculty of Mechanical Engineering, University of Skopje

[14] M.Essamei, Z.Radaković, A.Sedmak, B.Petrovski, (1999): Direktno merenje J integrala kao ocena podobnosti za upotrebu, Zavarivanje i Zavarene Konstrukcije 4/99, 137-141

[15] M. Essamai, (2000): Structural integrity assessment of pressure vessels with residual stresses, D.Sc. thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade



[16] Z.Radaković, A.Sedmak, (2000): Direktno merenje J integrala na cilindričnim posudama pod pritiskom, Sedma Međunarodna Letnja Škola Mehanike Loma, ured. S.Sedmak, A.Sedmak, GOŠA-TMF, 199 istraživanje ponašanja zavarenih posuda pod pritiskom sa prslinom, Zavarivanje i zavarene konstrukcije 1/00, 9-12

[17] A.Milovanović, A.Sedmak, A.Milosavljević, Z.Burzić, Ž.Šarkočević (2000): Eksperimentalno

[18] M. M. Ratwani, F. Erdogan and G. R. Irwin, (1974): Fracture propagation in cylindrical shell containing an initial flaw, Lehigh University, Bethlehem

[19] M. M. Ratwani, S. Sedmak and B. Petrovski, (1985): The assessment of residual strength of pressure vessel with surface crack by resistance curve, lecture in IFMASS 3, Fracture Mechanics of Weldments (in Serbian), edited by S. Sedmak, GOŠA, TMF, Beograd, 131-162

[20] R.B.King, et al, (1983): J integral analysis of surface cracks in pipeline steel plates, STP 803, ASTM, Philadelphia, USA, I-444-457

VESTI



NEWS

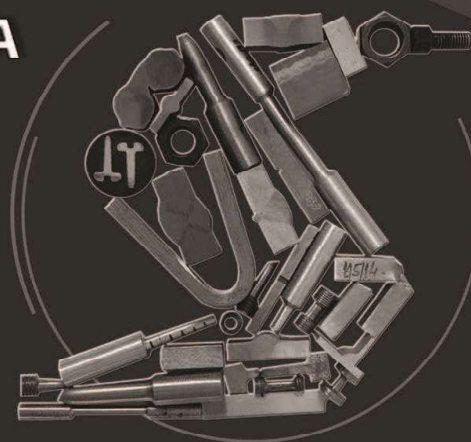
Konferencija o cevovodima i rezervoarima 5-6. novembar 2025., Fort Vort, Teksas, SAD

Ova konferencija se smatra vodećom u oblasti zavarivanja cevovoda. Konferencija će se fokusirati na ključne komponente koje čine okosnicu globalnog energetskog sektora: cevovode, rezervoare i skladišta. Učesnici će imati priliku da istraže i analiziraju teme koje oblikuju budućnost industrije - od zastarelih praksi do revolucionarnih rešenja. Konferencija će okupiti širok spektar stručnjaka, uključujući inženjere, građevinske stručnjake, inspektore i stručnjake za održavanje. Fokus će biti na napretku, izazovima i inovacijama koje doprinose poboljšanju transporta, skladištenja i rada postrojenja.

Za više informacija o konferenciji, posetite zvaničnu stranicu Američkog udruženja za zavarivanje (AWS) na internet adresi: <https://www.aws.org/community-and-events/conferences-and-events/pipeline/>.

Zoran Odanović

ISPITIVANJE MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA



www.sigmalab.rs



064 2142 473



Bojan Gligorijević ^{1,a}, Vencislav Grabulov ^{2,b}, Endre Romhanji ^{3,c}

MIKROSTRUKTURA, SPECIFIČNA ELEKTRIČNA PROVODLJIVOST I INTERKRISTALNA KOROZIJA ZAVARENIH SPOJEVA LEGURA AA6026/AA5183/AA6026 NAKON PULSNOG ZAVARIVANJA I NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE

MICROSTRUCTURE, ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND INTERGRANULAR CORROSION OF AA6026/AA5183/AA6026 ALLOY WELDED JOINTS AFTER PULSED WELDING AND POST-WELD HEAT TREATMENT

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Maj 2025.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Avgust 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Kamegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija

² Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), Grčića Milenka 67, 11000 Beograd, Srbija

³ Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Kamegijeva 4, 11120, Beograd, Srbija

email / ORCID ID:

^a bgligorijevic@tmf.bg.ac.rs / 0000-0001-6308-3366

^b vencigrabulov@gmail.com / 0000-0003-2020-5452

^c endre@tmf.bg.ac.rs /

Ključne reči: AA6026, pulsni MIG; pulsni TIG; zavareno stanje, T6 stanje, specifična električna provodljivost, interkristalna korozija

Keywords: AA6026, pulsed MIG; pulsed TIG; welding condition, T6 condition, electrical conductivity, intergranular corrosion

Rezime

U radu je ispitan uticaj unosa toplote i naknadne termičke obrade (rastvarajuće žarenje, kaljenje u vodi i veštačko starenje – T6 stanje) na mikrostrukturu, električnu provodljivost i interkristalnu koroziju zavarenih spojeva AA6026/AA5183/AA6026. Uzorci su bili zavareni pulsni MIG, pulsni TIG i kombinovanim pulsni TIG&MIG postupkom, dok je deo ispitivanih uzoraka bio preveden u T6 stanje. Niži unos toplote pulsni MIG postupkom uticao je na smanjeno izdvajanje intermetala po granicama zrna zavarenih uzoraka, što je uzrokovalo njihovu povećanu otpornost prema interkristalnoj koroziji u odnosu na uzorke zavarene pulsni TIG postupkom kod kojih je viši unos toplote podstakao intenzivnije izdvajanje intermetalnih faza i smanjio otpornost prema interkristalnoj koroziji. T6 tretman je delimično homogenizovao mikrostrukturu, ali je istovremeno doveo do taloženja Mg₂Si duž granica zrna u zoni uticaja toplote AA6026, kao i formiranje β-Al₃Mg₂ filmova po granicama zrna u metalu šava AA5183, što je kolektivno povećalo sklonost ka

Abstract

The present study examined the effect of heat input and post-weld heat treatment (solution annealing, water quenching and artificial aging – T6 condition) on the microstructure, electrical conductivity, and intergranular corrosion of AA6026/AA5183/AA6026 welded joints. The samples were welded using pulsed MIG, pulsed TIG, and combined TIG&MIG procedures, while a portion of the examined samples was subjected to the T6 condition. The lower heat input of the pulsed MIG process reduced intermetallic precipitation along grain boundaries in the welded samples, which resulted in higher resistance to intergranular corrosion compared to the pulsed TIG process, where higher heat input promoted more intensive precipitation of intermetallic phases and decreased resistance to intergranular corrosion. The T6 treatment partially homogenized the microstructure but also likely promoted the precipitation of Mg₂Si along grain boundaries in the heat-affected zone of AA6026 and the formation of continuous β-Al₃Mg₂ films along grain boundaries in the weld metal of



interkristalnoj koroziji. Najbolju otpornost su pokazali spojevi dobijeni primenom pulsnog MIG postupka sa niskim unosom toplote, dok su TIG&MIG spojevi, zahvaljujući još nižem unosu toplote, zadržali stabilnu korozionu postojanost čak i nakon T6 tretmana. Nasuprot tome, spojevi dobijeni pulsnim TIG postupkom sa većim unosom toplote su u T6 stanju pretrpeli najveću degradaciju otpornosti prema interkristalnoj koroziji. Ovi rezultati su potvrdili da je kontrola unete toplote bila presudan faktor koji je oblikovao mikrostrukturne promene, električnu provodljivost i sklonost ispitanih zavarenih spojeva prema interkristalnoj koroziji.

AA5183, which together increased susceptibility to intergranular corrosion of welded joints. The best resistance to intergranular corrosion was observed in joints produced by pulsed MIG welding with low heat input, while TIG&MIG joints, owing to even lower heat input, maintained stable intergranular corrosion resistance even after T6 treatment. In contrast, joints obtained by pulsed TIG welding with higher heat input suffered the most severe degradation of intergranular corrosion resistance in the T6 condition. These findings confirmed that controlling heat input was the decisive factor governing microstructural evolution, electrical conductivity, and the susceptibility of the welded joints to intergranular corrosion.

1. Uvod

Aluminijumska legura AA6026 pripada sistemu Al–Mg–Si razvijenom za dobru mašinsku obradivost i anodizaciju [1,2]. Danas postoje niskoolovne i bezolovne varijante ove legure (npr. 6026 LF), usklađene sa ELV/RoHS propisima [1]. U literaturi, svojstva ovih legura u zavarenom i naknadno termički obrađenom T6 stanju su dokumentovana na zanemarljivom nivou. Legure poput AA6082 se neretko koriste kao referentni materijali pri ispitivanju svojstava AA6026 legura [3]. Najverovatniji razlog za to je bliskost njihovog hemijskog sastava, kao i ponašanja tokom izlaganja uticaju povišenih i visokih temperatura.

Za zavarivanje Al legura se često primenjuju MIG (*Metal Inert Gas*) i TIG (*Tungsten Inert Gas*) postupci zavarivanja. Međutim, podaci vezani za svojstva zavarenih spojeva AA6026 legura dobijenih ovim postupcima zavarivanja nisu pronađeni u dostupnoj literaturi, a takođe i podaci vezani za T6 stanje zavarenih spojeva ovih legura.

Na osnovu prethodnog, cilj ovog rada je bio da se izvrši procena uticaja različitih postupaka zavarivanja (pulsni MIG, pulsni TIG, i kombinovani TIG&MIG), kao i uticaja naknadne termičke obrade ovih zavarenih spojeva (T6 stanje), na njihovu mikrostrukturu, specifičnu električnu provodljivost i otpornost prema interkristalnoj koroziji. U ovom radu su vršena poređenja pomenutih svojstava u karakterističnim zonama zavarenih spojeva, kao što su OM – osnovni material, ZUT – zona uticaja toplote, LS – linija stapanja i MŠ – metal šava.

2. Eksperimentalni deo

2.1. OM, dodatni materijal (DM), postupci i parametri zavarivanja, naknadna termička obrada

2.1.1. Hemijski sastav OM

OM je uzorkovan iz ekstrudovanih šipki legure AA 6026. Širina uzoraka OM za zavarivanje je iznosila oko 60 mm, a debljina oko 6 mm. Srednji hemijski sastav OM je dat u Tabeli 1.

Tabela 1. Srednji hemijski sastav ekstrudovanih šipki legure AA 6026 (mas. %).

Table 1. Average chemical composition of extruded AA 6026 alloy bars (wt. %).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Bi	V	Zr	Al
1.015	0.078	0.262	0.329	0.965	0.13	0.005	0.011	0.012	0.212	0.018	0.61	0.010	0.002	ost.



2.1.2. DM i primenjeni postupci zavarivanja

DM u svim slučajevima zavarivanja je bio AA5183 (Union AlMg4.5Mn Bohler) čiji su hemijski sastav i mehanička svojstva bili u skladu sa standardom EN ISO 18273. Za eksperimentalno zavarivanje ekstrudovanih uzoraka legure AA 6026 su korišćeni pulsni MIG i TIG postupci, kao i njihova kombinacija (TIG&MIG).

Sledeći opšti parametri zavarivanja pulsni MIG postupkom su primenjeni:

- Aparat za zavarivanje: Trans Puls Synergic 4000
- Struja zavarivanja: AC, pulsni režim rada
- Zaštitni gas: mešavina Argon- Helijum, Ar/He, 70/30
- Protok gasa: 18 l/min
- Tehnika zavarivanja: "unapred"
- Temperatura međuprolaza: 45-70°C
- Brzina dodavanja žice: 10-11 m/min
- Brzina zavarivanja: 45-70 cm/min

Sledeći opšti parametri zavarivanja pulsni TIG postupkom su primenjeni:

- Aparat za zavarivanje: Magic Wave 4000 Job G/F Fronius
- Prečnik volframove netopive elektrode: 3,2 mm
- Struja zavarivanja: AC, pulsni režim rada
- Zaštitni gas: Argon (Ar 5.0)
- Protok gasa: 12 l/min
- Tehnika zavarivanja: "unapred"
- Temperatura međuprolaza: 80-95°C
- Brzina zavarivanja: 10-16 cm/min

Tokom zavarivanja, korišćene su Al podloške sa korene strane zavarenih spojeva. Pre ispitivanja, podloške su bile uklonjene, a uzorci nisu bili predgrevani pre zavarivanja.

2.1.3. Parametri zavarivanja

U Tabeli 2 su dati prosečni parametri zavarivanja po jednom prolazu zavarivanja pet tipova uzoraka legure AA 6026. Iako nisu prikazane zbog preglednosti, standardne devijacije parametara zavarivanja u slučaju TIG&MIG uzoraka su bile vrlo slične prikazanim standardnim devijacijama uzoraka dobijenih pulsni TIG (TIG-1R i TIG-2) i pulsni MIG (MIG-1R i MIG-2) postupcima.

Tabela 2. Srednji parametri zavarivanja (sa standardnim devijacijama) pet ekstrudovanih uzoraka legure AA 6026 po jednom prolazu zavarivanja.

Table 2. Average welding parameters (with standard deviations) of five extruded AA 6026 alloy samples per single welding pass.

Uzorak	Postupak zavarivanja EN ISO 4063	Struja [A]	Napon [V]	Vreme [s]	Dužina prolaza [cm]	Brzina žice [m/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]	Temperatura međuprolaza [°C]	Uneta toplota [kJ/cm]
MIG-1R	131	170 ± 0	22.8 ± 0	26.7 ± 6.1	30.0	11.0 ± 0	70.0 ± 17.0	82.5 ± 2.5	2.8 ± 0.6
MIG-2	131	166 ± 5	22.6 ± 0.4	34.6 ± 7.4	30.0	10.7 ± 0.5	53.0 ± 11.0	75.0 ± 5.0	3.5 ± 0.9
TIG-1R	141	202.5 ± 15.0	11.9 ± 0.3	100.2 ± 10.4	30.0	--	18.2 ± 1.7	87.3 ± 6.7	4.8 ± 0.6
TIG-2	141	210 ± 10	12.1 ± 0.4	112.7 ± 32.6	30.0	--	16.7 ± 4.2	85.0 ± 5.0	5.7 ± 1.5
TIG&MIG	141 + 131	TIG: 220.0; MIG: 173.0	TIG: 11.6; MIG: 22.8	TIG: 122.0; MIG: 15.5	TIG: 30.0; MIG: 30.0	TIG: /; MIG: 11.0	TIG: 15.0; MIG: 120	TIG: 60.0; MIG: 88.0	TIG: 6.12; MIG: 1.22



Uzorci MIG-1R, MIG-2, TIG-2 su zavareni u tri sloja sa tri prolaza, dok su uzorci TIG-1R zavareni u tri sloja sa četiri prolaza (dva prolaza su primenjena u poslednjem sloju). Za razliku od uzoraka zavarenih u tri sloja pojedinačnim pulsним postupcima, uzorci TIG&MIG su zavareni u 4 sloja sa 7 prolaza, pri čemu je koreni prolaz zavaren primenom pulsog TIG postupka, dok su svi ostali prolazi popune izvedeni pulsним MIG postupkom.

2.1.4. Naknadna termička obrada

S obzirom da je plan korozivnih ispitivanja uključivao analize uzoraka u zavarenom i termički obrađenom stanju, uzorci u zavarenom stanju su bili podvrgnuti naknadnoj termičkoj obradi koja je uključivala rastvarajuće žarenje na 525°C u toku 1 h, nakon čega je izvršeno kaljenje uzoraka u vodi. Potom su uzorci veštački stareni na 175°C tokom 6 h. Brzina zagrevanja peći do 525 i 175°C je iznosila 200°C/h u oba slučaja. Termičko stanje koje je postignuto ovakvom naknadnom termičkom obradom je poznato kao T6 stanje. Nakon zavarivanja, uzorci MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG su prevedeni u T6 stanje.

2.2. Ispitivanje uzoraka

Na mestima početka procesa zavarivanja izvršeno je sečenje zavarenih ploča na oko 15 mm od ivica. Radi procene uticaja postupka zavarivanja na specifičnu električnu provodljivost, otpornost prema interkristalnoj koroziji i mikrostrukturu, uzorci sa oznakama MIG-1R i TIG-1R su ispitivani zavarenom stanju. Da bi se ocenio uticaj naknadne termičke obrade na pomenuta svojstva, uzorci MIG-2 i TIG-2 su, prema ranije opisanom postupku, bili podvrgnuti naknadnoj termičkoj obradi i zatim su bili ispitivani, a dobijeni rezultati su bili upoređeni sa onima za MIG-1R i TIG-1R uzorke u zavarenom stanju. Uticaj kombinovane primene postupaka zavarivanja procenjen je poređenjem rezultata uzoraka TIG&MIG u T6 stanju sa rezultatima uzoraka MIG-2 i TIG-2 u T6 stanju.

2.5.2. Merenja specifične električne provodljivosti

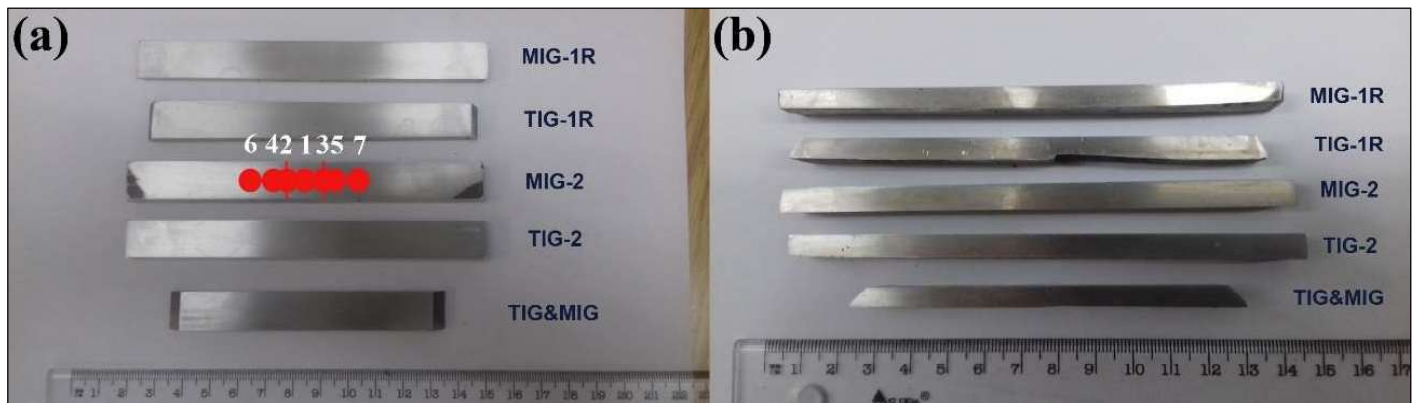
Specifična električna provodljivost uzoraka merena je SIGMATEST uređajem FOERSTER 2.069 pomoću sonde prečnika 8 mm (Slika 1). Nakon povezivanja priključaka za napajanje i sonde za merenje provodljivosti, uređaj je uključen i ostavljen oko 60 min da se temperira u uslovima okoline (sobna temperatura, normalni uslovi, ambijentalni vazduh). Potom je izvršena kalibracija u odnosu na vazduh (air-point), kao i Al i Cu standarde. Merenja su sprovedena na frekvenciji od 120 kHz u režimu CONTINUOUS merenja.



Slika 1. SIGMATEST uređaj sa mernom sondom (\varnothing 8 mm) i kalibracionim standardima
Figure 1. SIGMATEST device with measuring probe (\varnothing 8 mm) and calibration standards

S obzirom na to da merenje specifične provodljivosti zahteva ravnu površinu, lica i koreni zavara uzoraka dovedeni su mašinskom obradom

približno u ravan sa debljinom OM, što je prikazano na slikama 2a i 2b.



Slika 2. Uzorci i lokacije na kojima su vršena merenja specifične električne provodljivosti.

Figure 2. Samples and locations where specific electrical conductivity measurements were performed.

Na slici 2a je prikazan primer merenja sondom SIGMATEST uređaja na uzorku MIG-2. Vertikalne linije označavaju približne lokacije LS sa obe strane MŠ. Merenja su vršena u MŠ (merenja 1), na LS sa jednom polovinom sonde unutar MŠ, a drugom unutar ZUT (merenja 2 i 3), na lokacijama gde sonda tangira LS (merenja 4 i 5), kao i u OM, dalje od MŠ (merenja 6 i 7). Rastojanje između krajnjih tačaka merenja (6 i 7) sa obe strane MŠ iznosilo je oko 4 cm. Na svakoj lokaciji sprovedeno je najmanje pet merenja. Pre početka, površine uzoraka brušene su SiC voodotpornim abrazivnim papirima granulacije P-340, P-600, P-800 i P-1200.

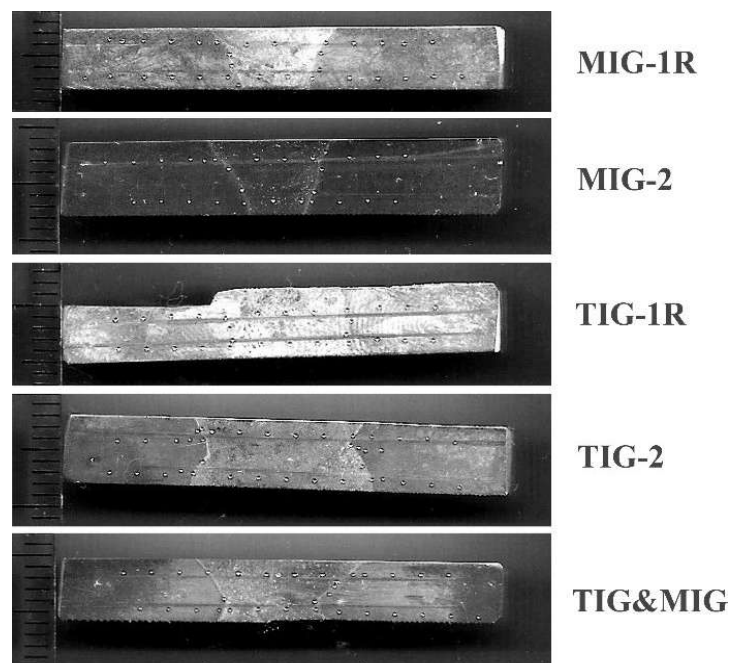
2.5.1. Mikrostrukturna ispitivanja

Nakon merenja specifične električne provodljivosti, površine uzoraka (Slika 2b) su bile

dodatno brušene SiC voodotpornim abrazivnim papirom granulacije P-2500, zatim polirane dijamantskim suspenzijama srednje veličine čestica od 6, 3 i 1 μm i finalno polirane nekristalizujućom silikatnom suspenzijom (OP-U, Buehler) sa veličinom čestica od 0.05 μm . Finalno polirane površine ispitane su svetlosnim mikroskopom u svetlom polju radi kvalitativne procene prisustva poroznosti, prslina i/ili intermetalnih faza.

2.5.2. Ispitivanja interkristalne korozije

Uzorci sa Slike 2 su isečeni na oko 1 cm sa obe strane MŠ i imali su dimenzije prikazane na Slici 3. Pored mikrostrukturnih ispitivanja, na ovim uzorcima su sprovedena i merenja tvrdoće HV5, koja nisu bila predmet istraživanja ovog rada.



Slika 3. Uzorci za ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju.

Figure 3. Samples for intergranular corrosion resistance testing

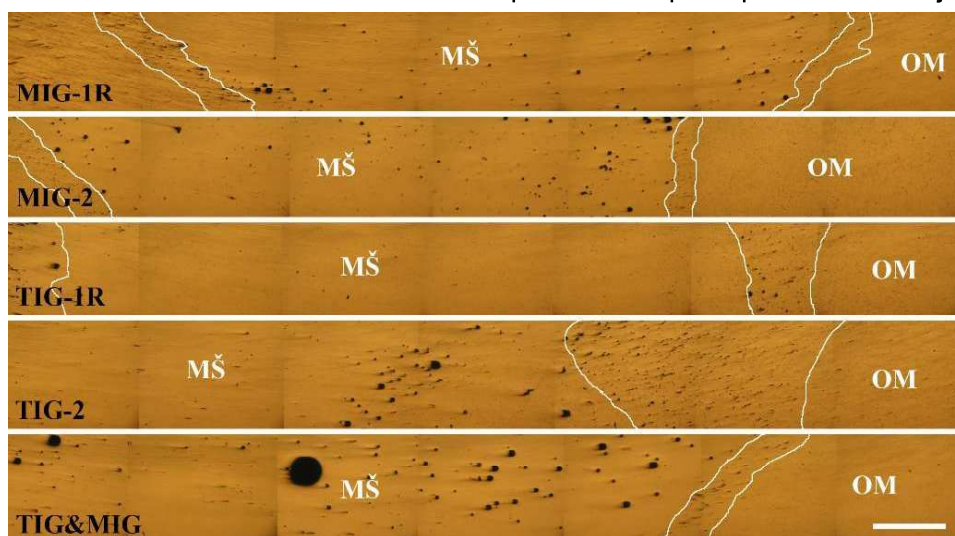


Ispitivanja korozionog ponašanja su izvedena prema standardu EN ISO 11846: *Korozija metala i legura – Određivanje otpornosti na interkristalnu koroziju legura aluminijuma za termičku obradu*. Uzorci su najpre očišćeni u acetonu, zatim osušeni i potopljeni u 7.5 mas.% vodenom rastvoru NaOH na oko 55°C. Nakon toga su isprani tehničkom vodom, dok su površinski produkti bili uklonjeni u koncentrovanoj azotnoj kiselini na sobnoj temperaturi, zatim ponovo isprani tehničkom i destilovanom vodom i na kraju osušeni. Svaki uzorak je potom potopljen u 500 ml vodenog rastvora NaCl (3 mas.%) i koncentrovane HCl (1 vol.%) na sobnoj temperaturi tokom 24 h. Prividna površina uzoraka u kontaktu sa rastvorom iznosila je oko 20 cm².

2. Rezultati

2.1. Makrostruktura zavarenih spojeva

Na Slici 4 belim linijama su označene oblasti MŠ i OM, između kojih se nalazi ZUT. Tačnu širinu ZUT nije bilo moguće precizno odrediti, pa je usvojen kriterijum na osnovu koga su ove oblasti razgraničene. Naime, u smeru OM ka MŠ, veličina Pb/Bi čestica je počinjala primetno da raste, što je uzeto kao početak ZUT (prva bela linija). LS se jasno prepoznavala po morfologiji intermetalnih faza raspoređenih između dendritnih grana na početku MŠ. Vredno je istaći da su širine pretpostavljenih ZUT bile u korelaciji sa količinom unete toplote po jedinici dužine zavarenih spojeva (Tabela 1). Manji unos toplote kod MIG-1R, MIG-2 i TIG&MIG uzoraka rezultovao je užim ZUT oblastima u poređenju sa TIG-1R i TIG-2 uzorcima (Slika 4). U MŠ je primećeno prisustvo mikroporoznosti, koja se uglavnom koncentrisala u blizini LS. Mikropore su bile zatvorenog tipa i sfernog oblika. Nije bila utvrđena korelacija između prisustva mikroporoznosti i primenjenih parametara/postupaka zavarivanja.



Slika 4. Makrostruktura zavarenih spojeva (polirano stanje). Dužina merne skale u donjem desnom uglu iznosi 1 mm.

Figure 4. Macrostructure of the welded joints (polished condition). The scale bar in the lower right corner represents 1 mm

2.2. Mikrostruktura zavarenih spojeva

Slike mikrostruktura zavarenih spojeva u poliranom stanju (Slika 1) pokazuju tipične raspodele intermetala koje su detektovane u OM, ZUT, na LS i u MŠ ovih spojeva. U ovom delu prvo će biti objašnjene mikrostrukture uzoraka u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R), nakon čega će biti objašnjene razlike u mikrostrukтури kod uzoraka u T6 stanju (MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG)

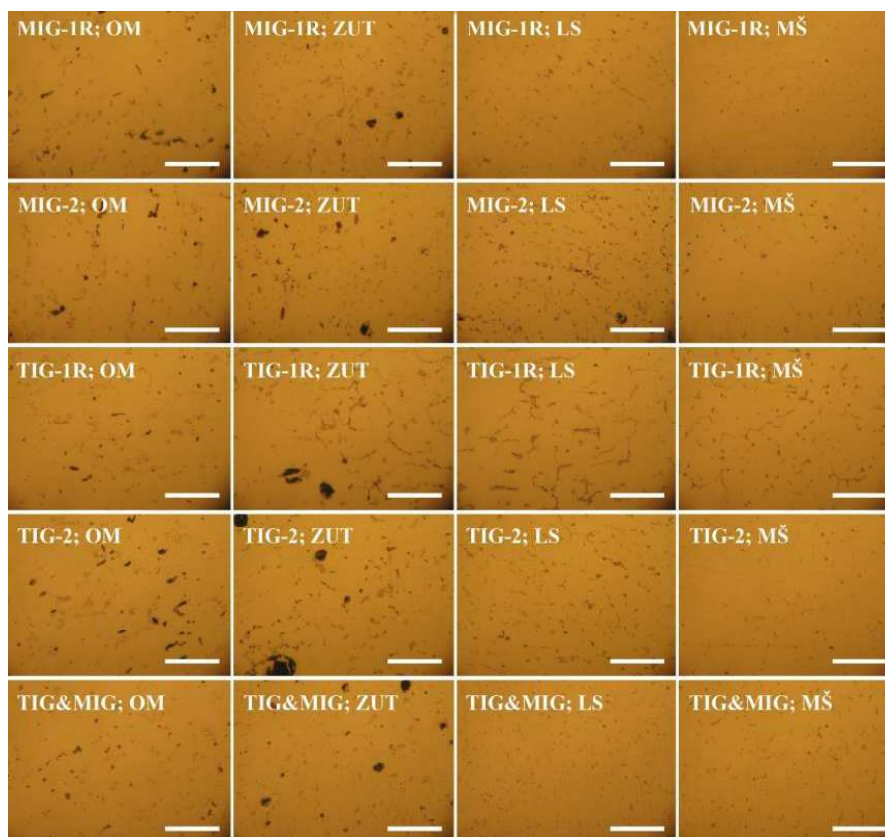
2.2.1. Mikrostruktura uzoraka u zavarenom stanju

U OM i ZUT MIG-1R uzoraka, čiji hemijski sastav odgovara leguri AA6026, koja sadrži Bi i Pb (Tabela 1), je primećeno prisustvo intermetala morfologije kineskih slova sive boje (verovatno α -AlFeSi), kao i sporadično prisustvo pločastih intermetala sive boje (verovatno β -AlFeSi). Tamnije igličaste faze, koje su sporadično detektovane su verovatno bile Mg₂Si čestice, dok su krupnije, tamnije faze nepravilnog oblika bile najverovatnije Pb i Bi čestice i/ili intermetalne čestice na bazi ovih



elemenata. U ZUT MIG-1R uzoraka, koji je bio izložen toplotnom dejstvu električnog luka, primećeno je manje prisustvo morfologije kineskih slova sive boje (verovatno α -AlFeSi), kao i pločastih intermetala slične nijanse (verovatno β -AlFeSi), pri čemu su pomenute čestice ove dve faze više težile sfernom obliku u poređenju sa odgovarajućim česticama u OM. Ovo je ukazivalo na pojavu delimične sferoidizacije i rastvaranja ovih čestica, što se posebno ogleda u skoro potpunom odsustvu tamnijih igličastih faza (Mg_2Si) i skoro potpunoj sferoidizaciji i ukrpupnjavanju tamnijih čestica na bazi Pb i Bi. Ono što je važno napomenuti je da su se intermetali retko raspoređivali po granicama zrna u ovoj oblasti. Drugim rečima, samo na pojedinim lokacijama su formirali morfologije nalik delimično kontinualnim filmovima po granicama zrna. U MŠ MIG-1R uzoraka, čiji sastav odgovara leguri AA5183, intermetalne čestice su bile sferičnog oblika i bile su ravnomerno raspoređene po celoj zapremeni ove oblasti. Na LS, veličina intermetala je bila izraženija u odnosu na MŠ, ali su ovi intermetali i dalje bili dominantno sferičnog oblika sa ravnomernom raspodelom u ovoj oblasti.

TIG-1R uzorci su ispoljavali veoma sličnu mikrostrukturu u OM u poređenju sa MIG-1R uzorcima. Međutim, u ZUT, TIG-1R uzorci su jasno pokazivali izraženije prisustvo α -AlFeSi, β -AlFeSi, i Mg_2Si faza u odnosu na ZUT MIG-1R uzoraka. Ove faze su bile izraženo prisutne po granicama zrna, što se povezivalo sa značajno većim unosom toplote po jedinici dužine zavarara pri pulsnom TIG zavarivanju u poređenju sa pulsним MIG zavarivanjem (Tabela 2). Naime, zbog većeg unosa toplote, ZUT TIG-1R uzoraka se sporije hladila, što je omogućavalo efikasniju difuziju elemenata iz čvrstog rastvora, a time i efikasnije formiranje intermetala po granicama zrna. U MŠ TIG-1R uzoraka je bila prisutna morfologija kineskih slova sive boje, a bile su detektovane i kompaktne čestice iste boje, što je ukazivalo na postojanje intermetala tipa $Al_6(Fe,Mn)$, $\alpha-Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ i/ili $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$. Takođe je bilo moguće i prisustvo Al_3Mg_2 intermetalne faze. Međutim, zbog svoje veličine, detekcija ovog intermetala svetlosnom mikroskopijom je bile upitna. LS TIG-1R uzoraka je karakterisala mešovita struktura uočena u ZUT i MŠ ovih uzoraka.



Slika 5. Tipična mikrostruktura finalno poliranih uzoraka zavarenih spojeva u OM, ZUT, na LS i u MŠ. Dužina svih mernih skala u donjim uglovima slika iznosi 50 μm .

Figure 5. Typical microstructure of welded joints after final polishing, shown in the base metal (OM), heat-affected zone (HAZ), fusion line (FL), and fusion zone (WM). The length of the scale bar in the lower left corner of each image is 50 μm .



2.2.1. Mikrostruktura uzoraka zavarenih spojeva u T6 stanju

U OM, ZUT i MŠ, mikrostruktura MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG uzoraka se karakterisala primetno smanjenim prisustvom intermetala morfologije kineskih slova, što je ukazivalo da su ovi intermetali bili delimično rastvoreni/sferoidisani tokom postupka rastvarajućeg žarenja. Intermetali su bili vidno manje zastupljeni po granicama zrna i nisu gradili kontinualne filmove po granicama zrna na način kako je to primećeno u slučaju uzoraka u zavarenom stanju. Međutim, u MŠ MIG-2, TIG-2 i

TIG&MIG uzoraka nije bilo uočljivo prisustvo Al_3Mg_2 po granicama zrna nakon senzitivizacije na $175^\circ C$ tokom 6 h, kao ni prisustvo Mg_2Si čestica u ZUT ovih uzoraka, što se pripisivalo malim dimenzijama ovih intermetala i nemogućnošću njihove detekcije svetlosnom mikroskopijom na finalno poliranim površinama uzoraka.

2.3. Specifična električna provodljivost različitih zona zavarenih spojeva

U Tabeli 3 su date srednje vrednosti specifične provodljivosti koje su izmerene u različitim zonama zavarenih spojeva.

Tabela 3. Srednje vrednosti specifične električne provodljivosti (MS/m) različitih zona zavarenih spojeva (za objašnjenje zona vidi Sliku 6).

Table 3. Mean values of electrical conductivity (MS/m) in different zones of welded joints (for explanation of zones see Figure 6).

Uzorak	Lokacija merenja						
	6	4	2	1	3	5	7
MIG-1R	24.9	25.9	21.8	12.7	23.44	25.6	24.3
MIG-2	25.4	25.5	19.8	14.5	19.1	25.3	25.4
TIG-1R	27.3	26.6	18.3	12.9	18.8	27.0	27.4
TIG-2	25.5	25.5	20.1	14.6	19.8	25.7	25.6
TIG&MIG	25.7	25.8	19.5	14.3	19.7	25.7	25.8

Zbog lakšeg razumevanja merenja, na Slici 6 su prikazana tipična merna mesta koja su prethodno objašnjena u poglavlju 2.5.2.



Slika 6. Lokacije merenja specifične provodljivosti. Vertikalne linije su linije stapanja (LS), a brojevi pokazuju sledeće merne lokacije: 1 – MŠ, 2 i 3 – na LS, 4 i 5 – sonda tangira LS, 6 i 7 sonda u OM. Prečnik sonde je iznosio 8 mm.

Figure 6. Locations of electrical conductivity measurements. Vertical lines represent fusion lines (FL), and the numbers indicate the following measurement positions: 1 – fusion zone (WM), 2 and 3 – on the FL, 4 and 5 – probe tangential to the FL, 6 and 7 – probe in the base metal (BM). The probe diameter was 8 mm.

Nakon izvršenih merenja, rezultati su očigledno pokazali da specifična električna provodljivost merena sa ovom dimenzijom sonde (8 mm) ne može da se koristi za tumačenja razlika u ZUT (merne lokacije 2 i 3, Slika 6) jer je širina ZUT bila značajnije manja od prečnika sonde (Slika 4). Međutim, rezultati dobijeni na mernim lokacijama 4-

7 su mogli da se tumače u slučaju OM, kao i oni dobijeni na mernoj lokaciji 1 u slučaju MŠ. Drugim rečima, ova merenja su davala pouzdanije rezultate jer je širina merne sonde približno odgovarala širini MŠ (Slika 4), a posebno širini OM, koja je bila značajno veća.

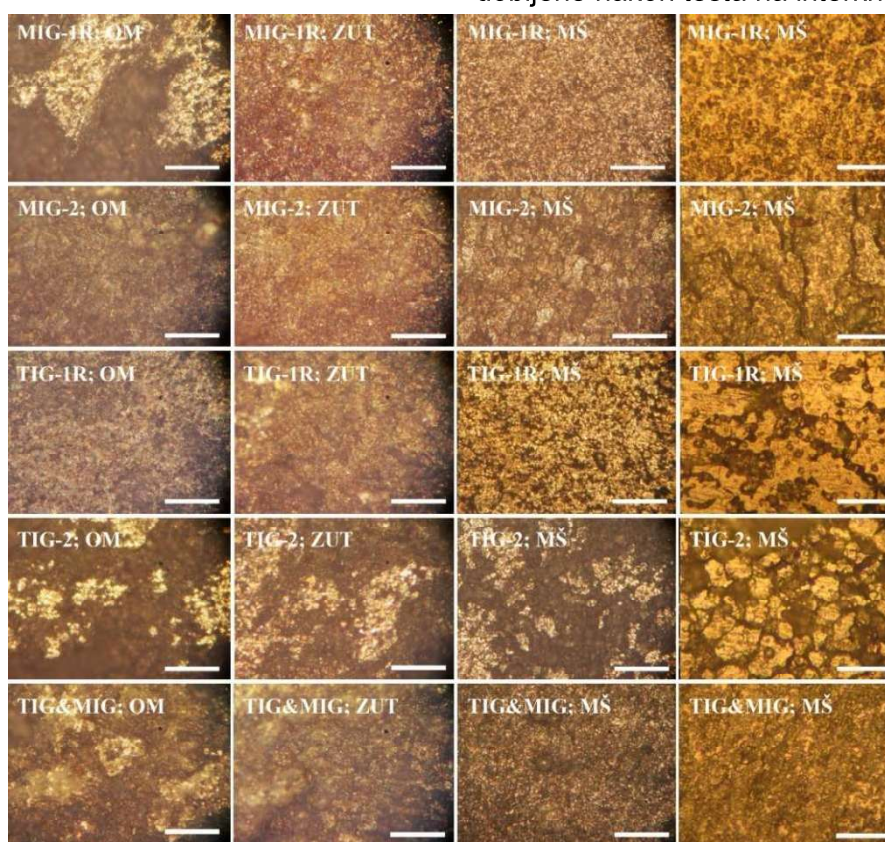


U OM svih uzoraka, razlike u vrednostima specifične električne provodljivosti nisu bile značajne, dok su nešto veće vrednosti zabeležene kod TIG-1R uzoraka (zavareno stanje). Ako se poredi vrednosti dobijene sa merne lokacije 1 (MŠ), vrednosti specifične električne provodljivosti kod svih zavarenih uzoraka u T6 stanju (MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG) su ispoljavale konzistentno veće vrednosti u poređenju sa uzorcima u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R). S druge strane, specifična električna provodljivost uzoraka TIG-1R (zavareno stanje) je bila nešto veća u MŠ nego što je to bio slučaj kod uzoraka MIG-1R (zavareno stanje).

Poznato je da vrednost specifične električne provodljivosti značajno varira sa udelom rastvorenih atoma unutar čvrstog rastvora. Sa povećanjem ovog udela, specifična električna provodljivost opada. Drugim rečima, svi uslovi koji su tokom zavarivanja ili naknadne termičke obrade podsticali formiranje čestica intermetala, tj. smanjivali udeo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru, su uticali na povećanje specifične električne provodljivosti.

2.4. Interkristalna korozija različitih zona zavarenih spojeva

Slika 7 prikazuje mikrostrukture različitih zona zavarenih spojeva u zavarenom i T6 stanju koje su dobijene nakon testa na interkristalnu koroziju.



Slika 7. Tipične mikrostrukture uzoraka zavarenih spojeva u OM, ZUT, i MŠ nakon ispitivanja otpornosti prema interkristalnoj koroziji. Dužina mernih skala na slikama u prve tri kolone je 50 μm , dok je dužina mernih skala u poslednjoj koloni slike 200 μm .

Figure 7. Typical microstructures of welded joint samples in BM, HAZ, and WM after intergranular corrosion resistance testing. The scale bar length in the first three columns is 50 μm , while in the last column it is 200 μm .

Ako se uporede uzorci u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R), tj. uticaj postupka zavarivanja, TIG-1R uzorci su u MŠ ispoljavali izraženiju interkristalnu koroziju u poređenju sa MŠ MIG-1R uzoraka gde pojava interkristalne korozije nije bila uočena. S druge strane, MŠ MIG-2 uzoraka (T6 stanje) u odnosu na MŠ MIG-1R uzoraka (zavareno stanje), kao i MŠ TIG-2 uzoraka (T6 stanje) u odnosu na MŠ TIG-1R uzoraka (zavareno stanje),

su pokazivali izraženiju interkristalnu koroziju, pri čemu je nivo degradacije korozivnih svojstava bio značajniji u slučaju uzoraka zavarenih pulsni TIG postupkom sa većim unosom toplote po jedinici dužine zavara. Slični nivoi degradacije su primećeni i u ZUT svih uzoraka. Ovi rezultati ukazuju da primena T6 naknadne termičke obrade nije poželjna sa stanovišta interkristalne korozione ispitanih zavarenih spojeva, posebno u slučaju



zavarivanja sa većom količinom toplote po jedinici dužine zavara.

TIG&MIG uzorci, zavareni kombinacijom pulsnih TIG i MIG postupaka sa najmanjom količinom unete toplote (Tabela 2), su ispoljili veoma sličnu korozionu postojanost kao uzorci MIG-1R (zavareno stanje), čak i u T6 stanju u kom su ispitani. Sa stanovišta interkristalne korozije, ovaj rezultat ukazuje na to da T6 naknadna termička obrada može da bude primenjena kod ispitanih zavarenih spojeva dobijenih sa manjim unosom toplote po jedinici dužine zavara u slučaju potrebe za poboljšanjem nekih drugih svojstava ovih zavarenih spojeva.

3. Diskusija rezultata

U zavarenom stanju se jasno pokazalo da je unos toplote ključni faktor koji određuje mikrostrukturu, električnu provodljivost i otpornost prema interkristalnoj koroziji. Kod MIG-1R uzoraka dobijenih pulsnih MIG postupkom, koji se karakterisao manjim unosom toplote i bržim hlađenjem, zabeleženo je manje prisustvo intermetalnih faza po granicama zrna u poređenju sa TIG-1R uzorcima. Ovakva mikrostrukturna konfiguracija je ograničavala nastanak galvanskih mikroćelija i smanjivala je sklonost prema interkristalnoj koroziji u MŠ ovih uzoraka. Nasuprot tome, u MŠ TIG-1R uzoraka dobijenih pulsnih TIG postupkom, koji se karakterisao većim unosom toplote i sporijim hlađenjem, zabeleženo je intenzivnije izdvajanje intermetalnih faza po granicama zrna nego u slučaju MIG-1R uzoraka, što je povećavalo mogućnost stvaranja kontinuiranih putanja interkristalnog korozionog napada, a time je i povećavalo sklonost prema interkristalnoj koroziji. Ove razlike su bile potvrđene i merenjem specifične električne provodljivosti. Naime, niže vrednosti u MŠ MIG-1R zavarenih spojeva su ukazivale na veći udeo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru i manje prisustvo intermetala, dok su više vrednosti u MŠ TIG-1R uzoraka potvrdile veću količinu istaloženih intermetala i manje prisustvo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru (Tabela 3). Merenja specifične električne provodljivosti nisu mogle da potvrde razlike u ZUT koje su bile prisutne kod MIG-1R i TIG-1R uzoraka. Međutim, izgled mikrostrukture nakon ispitivanja interkristalne korozije je to potvrdio na način da je degradacija materijala u ZUT TIG-1R uzoraka je bila nešto izraženija nego kod MIG-1R uzoraka (Slika 7).

Uopšteno, primena T6 režima (rastvarajuće žarenje, gašenje i veštačko starenje) dovodi do

homogenizacije mikrostrukture, ali takođe i do promena koje povećavaju sklonost prema interkristalnoj koroziji. U OM i ZUT, tokom rastvarajućeg žarenja, Mg_2Si čestice su se gotovo potpuno rastvorile, dok su se pločaste čestice $\beta-AlFeSi$ delimično rastvorile i/ili transformisale u stabilniju fazu tipa $\alpha-AlFeSi$. U MŠ, veće čestice tipa $Al_6(Fe,Mn)$ su opstale nakon rastvarajućeg žarenja, dok su prolazile kroz proces fragmentacije i sferoidizacije. Nakon kaljenja u vodi sa temperature rastvarajućeg žarenja, zavareni spoj je ostao u stanju prezasićenog čvrstog rastvora. Tokom starenja na $175^\circ C/6h$, došlo je do taloženja faza tipa Mg_2Si u OM i ZUT duž granica zrna, kao i do formiranja zona bez taloga. S druge strane, $\beta-Al_3Mg_2$ faza se formirala duž granica zrna u MŠ. Sinergijski, procesi taloženja su značajno povećali sklonost prema interkristalnoj koroziji. Ove promene su se direktno odrazile i na specifičnu električnu provodljivost koja je u MŠ svih T6 uzoraka bila viša od one zabeležene u MŠ kod uzoraka zavarenom stanju. Razlog za to je taj što se tokom procesa taloženja na T6 uslovima smanjio sadržaj rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru u većoj meri u odnosu na MŠ uzoraka u zavarenom stanju. U korozionim ispitivanjima svi T6 uzorci u MŠ su pokazali izraženiju degradaciju materijala u poređenju sa zavarenim stanjem. Ovo je u skladu sa većim vrednostima specifične električne provodljivosti izmerenim u MŠ T6 uzoraka. Veća vrednost je ukazivala na izraženije prisustvo lako rastvorljivih čestica taloga po granicama zrna. Ovi rezultati su potvrdili da je unos toplote tokom zavarivanja jedan od ključnih parametara koji je primetno uticao na ponašanje zavarenih spojeva u T6 stanju u uslovima interkristalne korozije. Kontrolisani režimi zavarivanja sa malim unosom toplote po jedinici dužine zavara su mogli da ublaže negativne efekte T6 termičkog tretmana na otpornost ispitanih uzoraka prema interkristalnoj koroziji.

Zahvalnica / Acknowledgements

Rad je realizovan uz finansijsku podršku EUREKA projekta E!9992 EcoExtrusions (2016–2019) i Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (451-03-136/2025-03/200287).

This work was carried out with the financial support of the EUREKA project E!9992 EcoExtrusions (2016–2019) and the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (451-03-136/2025-03/200287).



4. Zaključak

Ovaj rad je pokazao jasnu povezanost unosa toplote, mikrostrukture, električne provodljivosti i interkristalne korozije u AA6026/AA5183/AA6026 zavarenim spojevima. Rezultati su ukazivali na to da je najstabilnije stanje za otpornost prema interkristalnoj koroziji bilo upravo zavareno stanje uzoraka dobijenih sa niskim unosom toplote (MIG-1R uzorci). Međutim, dalja ispitivanja uzoraka zavarenih kombinacijom pulsnih TIG (koreni prolaz) i MIG (popuna) postupaka (TIG&MIG) primenom još nižeg unosa toplote su pokazala da T6 naknadna termička obrada može biti uspešno primenjena kod zavarenih spojeva dobijenih sa nižim unosom toplote. Nasuprot tome, zavareni spojevi dobijeni primenom pulsnih TIG postupka sa višim unosom toplote su pokazali da T6 naknadna termička obrada još više degradira otpornost ovakvih spojeva prema interkristalnoj koroziji.

Literatura / References

[1] Impol d.d., Aluminium alloy EN AW 6026, datasheet, v3/2022.

[2] Eural Gnutti, 6026 Lead Free (6026 LF) datasheet, 2018.

4. Conclusion

This study demonstrated a clear correlation between heat input, microstructure, electrical conductivity, and intergranular corrosion in AA6026/AA5183/AA6026 welded joints. The results indicated that the most stable condition for intergranular corrosion resistance was the as-welded state of samples produced with low heat input (MIG-1R). However, further examination of samples welded using a combination of pulsed TIG (root pass) and pulsed MIG (filling passes) procedures (TIG&MIG), with even lower heat input, showed that the T6 post-weld heat treatment could be successfully applied to welded joints produced under reduced heat input. In contrast, welded joints obtained by pulsed TIG welding with higher heat input showed that the T6 post-weld heat treatment further degraded their resistance to intergranular corrosion.

[3] Kamarska, K. (2020): Corrosion Behaviour of Aluminium Alloys EN AW-6026 and EN AW-6082 in a Sulphuric Acid Medium. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 878 (1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012067>

VESTI



NEWS

MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU TRENJEM (IFWC)

19-21 May 2026 TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AL

Međunarodna konferencija o zavarivanju trenjem (IFWC) je veliki međunarodni događaj za istraživače, inženjere i stručnjake iz industrije zainteresovane za tehnike spajanja i obrade metala zasnovane na trenju. To je nova udružena konferencija koja spaja dva dugogodišnja, dobro uspostavljena simpozijuma: Međunarodni simpozijum o zavarivanju trenjem sa mešanjem (FSW) i Međunarodni simpozijum o zavarivanju linearnim trenjem (LFW).

Konferencija pokriva širok spektar tehnologija zasnovanih na trenju, uključujući, ali ne ograničavajući se na: rotaciono zavarivanje trenjem, linearno zavarivanje trenjem, zavarivanje trenjem sa mešanjem i obradu trenjem sa mešanjem. Takođe uključuje sesije o srodnim temama kao što su ispitivanje bez razaranja, numeričko modelovanje i industrijske primene. Događaj je osmišljen da podstakne značajnu, višedisciplinarnu razmenu mišljenja između stručnjaka iz različitih oblasti.

Konferencija 2026. godine održaće se u sedištu TWI Ltd (The Welding Institute) u blizini Kembridža, u Velikoj Britaniji. Ova lokacija je značajna jer je TWI mesto gde je 1991. godine izmišljen proces zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW).

Događaj privlači globalnu publiku akademika i stručnjaka iz industrije. To je ključna prilika za istraživače da predstave svoja najnovija otkrića i za stručnjake iz prakse da saznaju o novim primenama i saznanjima. Program uključuje tehničke prezentacije, poster sesije i događaje za umrežavanje.

Spajanjem ova dva simpozijuma, IFWC pruža sveobuhvatan forum za celokupnu zajednicu zavarivanja trenjem. Konferencija se nadovezuje na istoriju dugu decenijama u ovim oblastima, nudeći jedinstvenu priliku za povezivanje, saradnju i doprinos budućnosti zavarivanja trenjem i njegovih primena u industrijama kao što su vazduhoplovstvo, automobilska industrija i brodogradnja. Više informacija na internet adresi: <https://www.twi-global.com/media-and-events/events-diary/international-friction-welding-conference-2026>.

Zoran Odanović



Andraž Logar ^{1,a}, Damjan Klobčar ^{2,b}, Aleš Nagode ³, Uroš Trdan ^{2,c}, Gregor Černivec ^{1,d}, Matija Bušić ^{4,e}, Miodrag Milčić ⁵, Dragan Milčić ⁵, Nataša Zdravković ⁵, Tomaž Vuherer ⁶, Aleksija Đurić ⁷

SUSTAINABLE FABRICATION OF SOLID-WIRE ELECTRIC CONTACTS: ULTRASONIC WELDING VS. SOLDERING

ODRŽIVA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIH SPOJEVA OD PUNE ŽICE: ULTRAZVUČNO ZAVARIVANJE NASPRAM LEMLJENJA

Original scientific paper / Originalni naučni rad

Paper received / Rad primljen:

September 2024.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

March 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹ BOSCH REXROTH d.o.o., Zgomji Bmik 410, 4210 Bmik, Slovenia

² Laboratory for Welding, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

³Department of Materials and Metallurgy, University of Ljubljana, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia;

⁴ Department of Mechanical Engineering, University North, University Center Varaždin, Jurja Križanića 31b, 42000, Varaždin, Croatia

⁵ Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia

⁶ Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenia

⁷ Faculty of Mechanical Engineering, University of East Sarajevo, Vuka Karadžića 30, 71123 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

email / ORCID ID:

^a andraz.logar@boschrexroth.si

^b damjan.klobcar@fs.uni-lj.si

^c uros.trdan@fs.uni-lj.si

^d gregor.cernivec@boschrexroth.si

^e mbusic@unin.hr

Keywords: solid copper wires; ultrasonic welding; soldering; joint strength; electrical conductivity, sustainability

Ključne reči: pune bakrene žice; ultrazvučno zavarivanje; lemljenje; nosivost spojeva; električna provodljivost, održivost

Abstract

Sustainable joining technologies are important manufacturing processes for the production of high-quality joints of electrical connections. High-quality connections must have high electrical and thermal conductivity to reduce energy losses during their lifetime, they must have high mechanical properties to achieve a long service life, and they must be manufactured with lower energy consumption. In this article, the properties of solid wire electrical contacts produced by ultrasonic welding and soldering were compared. Ultrasonic welding of thin solid copper wires was performed with a copper ring. A particular focus of this study is on the energy used to produce these joints. The research included electrical resistance, peel strength and

Rezime

Održive tehnologije spajanja važni su proizvodni procesi za proizvodnju visokokvalitetnih električnih spojeva. Visokokvalitetni električni spojevi moraju imati visoku električnu i toplotnu provodljivost kako bi se smanjili gubici energije tokom životnog veka, moraju imati visoka mehanička svojstva da bi postigli dug vek trajanja i moraju biti proizvedeni sa što manjom potrošnjom energije. U ovom radu, podređena su svojstva punih žičanih električnih spojeva proizvedenih ultrazvučnim zavarivanjem i lemljenjem. Ultrazvučno zavarivanje punih bakrenih žica izvedeno je sa bakarnim prstenom. Poseban fokus ove studije je na potrošenoj energiji koja se koristi za proizvodnju ovih spojeva. Istraživanje je uključivalo ispitivanje električne otpornosti, te

The paper was published in its original form in the Proceedings of the 33rd Conference with international participation "Welding 2024" held in Vrnjačka Banja, Serbia from October 2 to 5, 2024.



tensile strength tests. The results of the electrical resistance showed similar electrical resistance between the two processes. The result of mechanical strength shows that ultrasonic joints achieved higher mechanical strength. The most important result is that ultrasonic welding consumed only 11% of the energy to produce the joint compared to soldered joints.

ispitivanje nosivosti na ljuštenje i zatezanje. Rezultati električnog otpora pokazali su sličan električni otpor između dva procesa. Kada je riječ o nosivosti rezultati pokazuje da su ultrazvučni spojevi postigli veću mehaničku nosivost. Najvažniji rezultat je da je ultrazvučno zavarivanje potrošilo samo 11% energije za proizvodnju spoja u odnosu na zalemljene spojeve.

1. Introduction

The current global trend is electrification and automation in all areas. This means that the production of electric motors is increasing because they are becoming more and more present in our everyday lives. As production increases, so does the energy consumption involved in their production. One of the most important processes in the production of electric motors is the joining of copper wires with conductors and contacts. To be used effectively, these wires must be connected to electrical conductors or contacts that offer mechanical strength, vibration resistance, temperature resistance and high conductivity. Engineers must select suitable joining technologies, considering the load conditions, service life, manufacturability and sustainability, as each joining method has its advantages and disadvantages. Common technologies for joining wires to conductors or contacts include electrical resistance welding, soldering, crimping and welding with mechanical energy [1]. In this article, we will focus on soldering and ultrasonic welding, their sustainability and the quality of the resulting joint.

Soldering, which uses heating methods such as oxyfuel, electrical resistance, induction and laser [2], is versatile and joins wires and conductors with different cross-sections without process changes. The quality depends on an optimized joining gap, overlap, cleanliness, uniform temperature and stability of the factors. This results in large joints with low electrical resistance and high strength, but is prone to corrosion [3-6] and microstructural changes [3,7,8]. High potential differences and different compositions between the wire and the filler material can lead to deterioration [9]. Filler materials often contain toxic lead [10], and silver solder, which is commonly used with copper, is expensive and a critical raw material [11].

Ultrasonic welding (UW) is a promising technology for joining wires and braids without filler material by converting electrical energy into high-frequency mechanical vibrations to create a metallurgical bond [12]. With UW, different wire cross-sections can be welded with a single tool, ensuring excellent thermal and electrical conductivity without melting the base materials [2]. However, the strength of ultrasonic joints is sensitive to peel strength, especially in wire welding. Reinforcing elements such as rings can increase the strength of the joint, especially for wires with smaller diameters [13-15]. Increased welding time or energy can lead to material thinning and lower joint strength as the sonotrode penetrates deeper [16-19].

Logar et al. [19] have analysed both processes in detail. The results show that the thermal shock test does not affect the quality of the connections. They also showed that the electrical conductivity of both methods is comparable and that UW joints with a ring can withstand higher loads than soldered joints.

While research confirms the suitability of both methods, there are no studies on their sustainability and energy consumption. Since the early 2000s, the term 'sustainability' has become increasingly important due to the growing need to protect the environment and its resources. The industrial sector currently accounts for 25% of energy consumption in Europe [20], emphasizing the need for sustainable techniques to reduce resource consumption and promote environmentally friendly production.



2. Materials and methodes

2.1 Materials and preparation of samples for welding and soldering

The sketch of the specimens prepared for welding and soldering is shown in Figure 1. A 0.71 mm diameter wire of C11000 copper was used for experimental welding. The wire was coated with two different coatings, one over the other, the first

being polyester and the second polyamide-imide. The coating itself can withstand 200 °C [21].

Before preparing the welds, the coatings were removed with a special preparation of Abiofix, which has 3 hard blades on the cutting head. By rotating the head, the blades close and grind the coating off the wires.

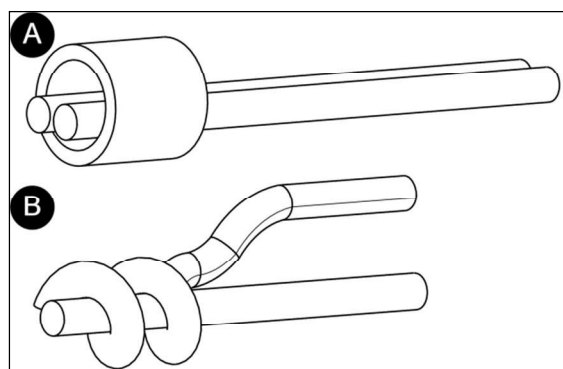


Figure 1. A sketch of sample wires ultrasonic welding (A) and for soldering (B)

Slika 1. Skica žica za ultrazvučno zavarivanje (A) i za lemljenje (B)

The wires for ultrasonic welding were putt inside the ring (Figure 1A). The dimensions of the ring used for the UW were an inner diameter of 2 mm, an outer diameter of 3 mm and a length of 4 mm.

The copper wires for soldering (Figure 1B) were prepared by wrapping the wires. The solder used was BrazeTec S 15, which contains 15% Ag and 5% P [22]. The detailed mechanical properties of C11000 copper and solder BrazeTec S 15 are listed in Table 1.

Table 1. The physical properties of copper C11000 wires [23] and solder BrazeTec S 15 [22]

Tabela 1. Fizička svojstva bakarnih žica C11000 wires [23] i lema BrazeTec S 15 [22]

Properties	C11000	BrazeTec S 15
Melting range [°C]	1083	645-800
Density [g/cm ³]	8.89	8.4
Tensile strength [MPa]	380	250 with Cu
Elongation [%]	1.1	10
Electrical conductivity [m/Ωmm ²]	57 - 59	7
Operating temp. of brazed joint [°C]	-	150

2.2 Soldering and Ultrasonic welding of prepared wires

The experimental joining of the wires was made by soldering and ultrasonic welding. Soldering was performed using an Oswlad gas generator. The generated gas (hydrogen and oxygen) produces a neutral flame that develops a temperature of about

3650 °C and can be used for welding, brazing, or soldering of all nonferrous materials in a short time [24].

In our case, we first preheated the wires for 10 seconds and then solder them after they reached about 450 °C. Ultrasonic welding was performed using the Branson GMX-W1 ultrasonic wire splicer.



This is a fully automatic ultrasonic wire splicing system can make connections with a cross-section of 0.06 mm² to 32 mm².

All joints were made by 'Welding To Energy', which means that the main triggering parameter is

the energy required to form a joint, which was kept constant for all tests, allowing the time to be adjusted to suit the condition of the materials during welding. Experimental welding parameters are shown in the Table 2.

Table 2. Experimental welding parameters

Tabela 2. Eksperimentalni parametri zavarivanja

Parameters	Value
Energy [J]	140
Pressure before and during welding [bar]	1.38
Amplitude [μm]	20
Jaw width [mm]	4.46

2.3 Measurement of energy consumption

The power consumption was measured with Metrel Power Q4. The Metrel PowerQ4 is a sophisticated network diagnostic tool designed to analyze and troubleshoot power quality issues in electrical networks. Since the Branson GMX-W1 ultrasonic wire splicer operates on single-phase current, while the Oswald gas generator for

soldering operates on three-phase current, we performed the measurements in two different ways. The Branson GMX-W1 ultrasonic wire splicer was measured using the 1-phase 3-wire system, schematically shown in Figure 2A, and the Oswald gas generator was measured using the 3-phase 4-wire system, schematically shown in Figure 2B. Energy consumption together with losses was measured on 10 welding samples for each process.

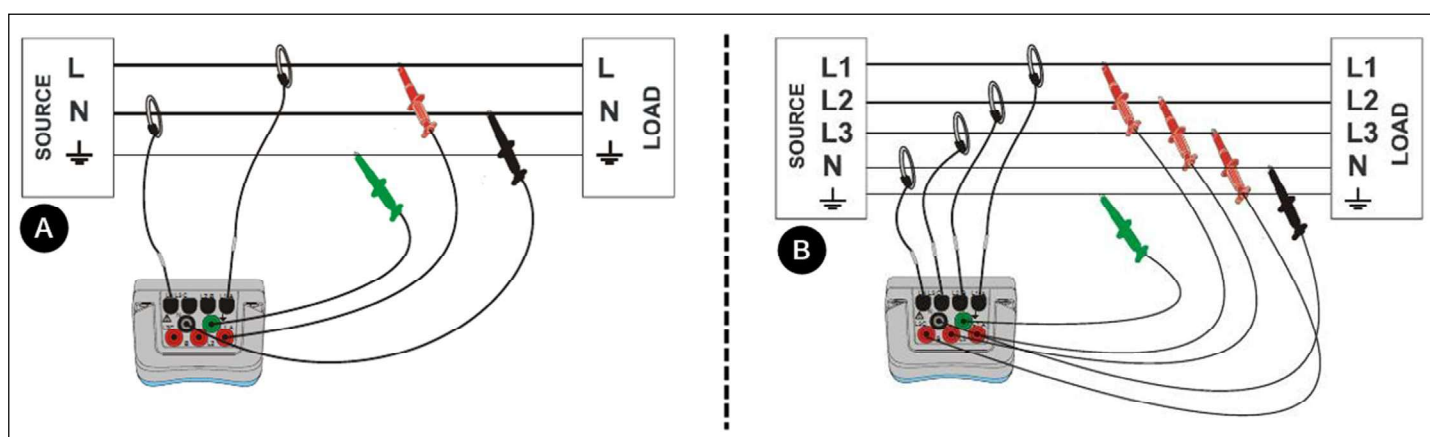


Figure 2. Measurement of energy consumption: ultrasonic welding with 1-phase 3-wire system (A) and soldering with 3-phase 4-wire system (B) [25]

Slika 2. Merjenje potrošnje energije: ultrazvučno zavarivanje sa 1-faznim 3-žičnim sistemom (A) i lemljenje sa 3-faznim 4-žičnim sistemom (B) [25]



2.4 Measurement of electrical resistance

Electrical resistance measurements were performed on 10 UW samples and 10 soldered samples (Figure 3) using the Keysight 34420A nano-volt/micro-ohm meter. The 4-wire resistance measurement was used because of the lower resistance values, since this method eliminates the resistance of the meter contacts. Prior to testing,

the wires were also grind at the gage attachment point. The connection clamps were placed/installed 3 mm from the weld or solder joint on each side of the connection. Each sample was measured 3 times. The average of all three measurements was considered. The results were recorded at the microhm level.

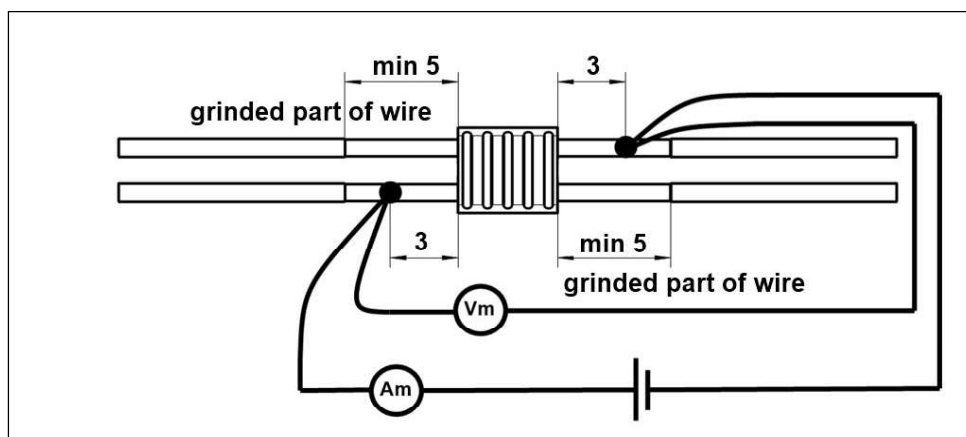


Figure 3. Display of contact layout for electrical resistance measurement on the example of a UW joint

Slika 3. Prikaz rasporeda kontakata za merenje električnog otpora na primeru UV spojnice

2.5 Mechanical testing of joints

Tensile strength tests and peel force tests were performed in accordance with MAN Truck & Bus AG WORKS Standard M 3455 [26]. The Zwick Z150 universal tensile testing machine with the KAP-S 2 kN load cell was used to perform both tests. The tests were performed using Zwick TestExpert II software. Both tests were done with

the pulling speed of 50 (+5) mm/min. The samples were gripped in grips specially developed for testing of wires and cables. Peel force testing was performed on 10 UW samples and 10 soldered samples (Figure 4A), while tensile testing was performed on 5 UW samples and 5 soldered samples (Figure 4B).

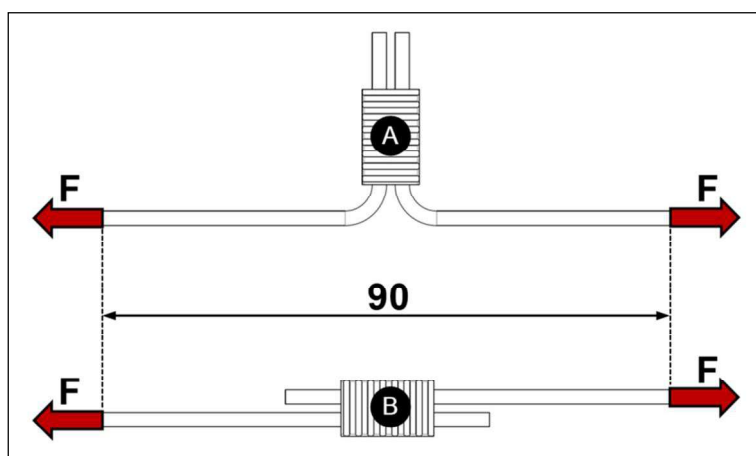


Figure 4. Mechanical test: peel force test (A), tensile strength test (B)

Slika 4. Mehanički ispitivanja: sile ljuštenja (A), zatezne čvrstoće (B)



3. Results and discussion

In the comparative analysis of energy consumption between ultrasonic welding and soldering it was found that the energy consumption for ultrasonic welding was $1413.8 \text{ J} \pm 110.25 \text{ J}$ and for soldering was $20482.5 \text{ J} \pm 1590.28 \text{ J}$. Ultrasonic welding demonstrates a significantly higher efficiency, consuming around 14 times less energy than soldering. It can be also seen from standard deviations, that human intervention in manual soldering has a more significant impact on the soldering process compared to ultrasonic welding. In Figure 5 A, it can be seen that 62787 J of energy

was used for the three referenced soldered joints, while only 6085.5 J of energy was used for the three referenced ultrasonically welded joints. It can also be seen (Figure 5 B) that the peak power for ultrasonic welding was $564 \text{ W} \pm 34.67 \text{ W}$, while for soldering was $1968 \text{ W} \pm 50.34 \text{ W}$, which is 3.5 times higher. Additionally, the time needed to make three joints is 2.4 times shorter for ultrasonic welding (18 s vs. 44 s) compared to soldering. This substantial difference highlights the potential for energy savings and efficiency improvements through the adoption of ultrasonic welding in relevant applications.

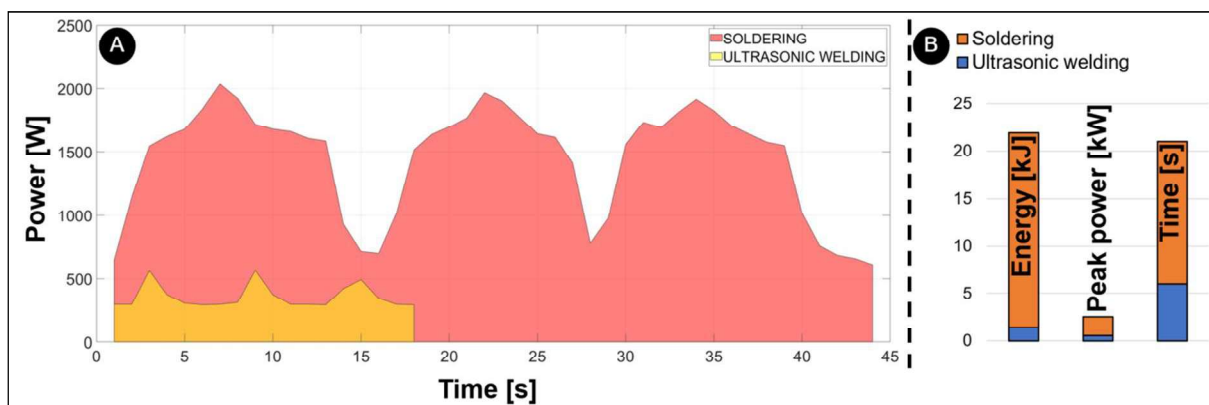


Figure 5. Power consumption for three ultrasonic reference joints (yellow) and three solder reference joints (red) (A) and a comparison of energy, peak power and time per weld for soldering (orange) and ultrasonic welding (blue) (B)

Slika 5. Potrošnja energije za tri ultrazvučna referentna spoja (žuta) i tri referentna spoja za lemljenje (crvena) (A) i poređenje energije, snage i vremena po zavaru za lemljenje (narandžasto) i ultrazvučno zavarivanje (plavo) (B)

3.1 Measurement of electrical resistance

Figure 5 shows a Box-Whiskers diagram comparing the electrical resistance between UW joints, soldered joints and wire. The electrical resistance of UW samples was $989 \mu\Omega \pm 18 \mu\Omega$, and electrical resistance of soldered samples was $871 \mu\Omega \pm 14 \mu\Omega$. The electrical resistance of wire was $976 \mu\Omega \pm 14.5 \mu\Omega$. Through the mean values, it can be seen, that the results are in the same range. It is logical that the electrical resistances of the different joining methods are not the same,

because the cross section of the joint has a great influence on the electrical resistance. It can also be seen that the electrical resistance of the wire and the UW joint were almost the same. So, it can be said that the ring does not have a big effect, but the amount of solder on the soldered joint does. A comparable study was conducted using both an ultrasonic and a soldered joint with 3 wires. The results revealed opposite that the electrical resistance of the ultrasonically welded joint was 28% lower [19].



Figure 6. Comparison of electrical resistance between the UW joints (blue), soldered joints (orange), and wire (grey)

Slika 6. Poređenje električnog otpora između UV spojeva (plavo), lemljenih spojeva (narandžasto) i žice (sivo)

3.2 Mechanical testing of joints

Figure 7 shows a comparison of the peel strength of UW and soldered joints. The peel strength of UW samples was $88.8 \text{ N} \pm 0.35 \text{ N}$, and the peel strength of soldered samples was $38.5 \text{ N} \pm 1.2 \text{ N}$. From the comparison of UW welding and

soldering, it can be seen that stronger joints are obtained with UW welding. A comparable study was conducted using both an ultrasonic and a soldered joint with 3 wires. The results point in the same direction, whereby it was found that the ultrasonically welded joint had a 42% higher peel strength [19].



Figure 7. Comparison of peel force between UW joints (blue) and soldered joints (orange)

Slika 7. Poređenje sile ljuštenja između UV spojeva (plavo) i zalemljenih spojeva (narandžasto).



Figure 8 shows results of tensile strength test. The tensile strength of UW samples was $97.5 \text{ N} \pm 2.1 \text{ N}$, and the tensile strength of soldered samples was $91.3 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$. Tensile strength of wire was $109.5 \text{ N} \pm 0.9 \text{ N}$. UW joints have higher tensile properties compared to soldered joints. From the fractures can be also seen that UW joints don't

break in the joint but in the area where gripper was attached. A comparable study was conducted using both an ultrasonic and a soldered joint with 3 wires. The results point in the same direction. It was found that the ultrasonically welded joint had a 12% higher tensile strength [19].

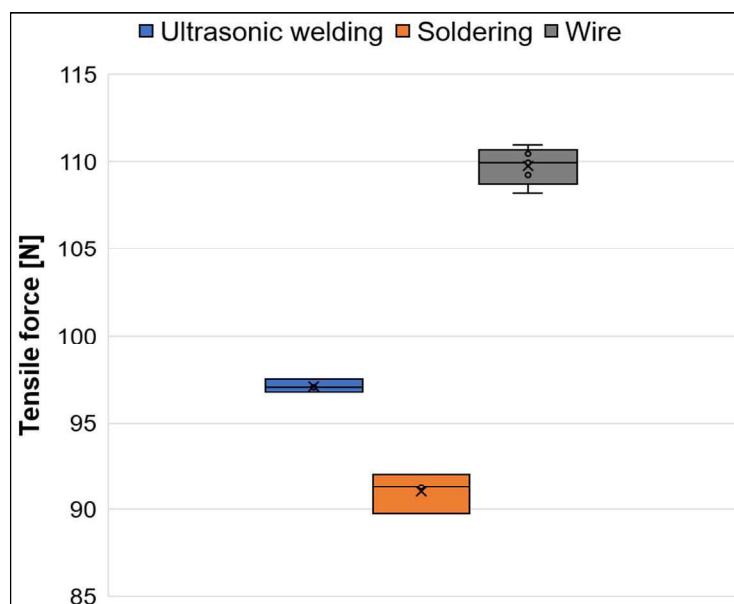


Figure 8. Comparison of tensile force between UW joints (blue), soldered joints (orange) and wire (grey)

Slika 8. Poređenje zatezne sile između UV spojeva (plavo), lemljenih spojeva (narandžasto) i žice (sivo)

5. Conclusions

This paper presents a comparative analysis of ultrasonic welding and the soldering of two thin copper wires with ring. The evaluation included the measurement of energy consumption, measurement of electrical resistance, peel strength testing, and tensile strength testing. The study led to the following conclusions:

1. Ultrasonic welding is significantly more energy-efficient and time-efficient compared to soldering, consuming 10-15 times less energy and taking 2-3 times less time to create joints. These advantages, coupled with greater consistency, process stability and reduced human influence, make ultrasonic welding a superior choice for relevant applications.
2. The electrical resistance of ultrasonically welded and soldered joints are similar. However, the soldered joints have a higher electrical conductivity, which is an effect of the amount of solder that is added by hand.

5. Zaključak

U radu je data komparativna analiza ultrazvučnog zavarivanja i lemljenja dve tanke bakarne žice sa prstenom. Evaluacija je uključivala merenje potrošnje energije, merenje električnog otpora, ispitivanje čvrstoće na ljuštenje i ispitivanje zatezne čvrstoće. Studija je dovela do sledećih zaključaka:

1. Ultrazvučno zavarivanje je znatno energetski efikasnije i vremenski efikasnije u poređenju sa lemljenjem, troši 10-15 puta manje energije i oduzima 2-3 puta manje vremena za stvaranje spojeva. Ove prednosti, zajedno sa većom konzistentnošću, stabilnošću procesa i smanjenim ljudskim uticajem, čine ultrazvučno zavarivanje superiornim izborom za relevantne primene.
2. Električni otpor ultrazvučno zavarenih i zalemljenih spojeva je sličan. Međutim, zalemljeni spojevi imaju veću električnu provodljivost, što je posledica količine lema koji se dodaje ručno.



3. Mechanical testing shows that ultrasonic welding produces more resilient joints compared to manual soldering, with more consistent results, highlighting the benefits of automation.

To summarize, ultrasonic welding offers significant advantages over soldering, being more energy-efficient and faster in creating joints, with greater consistency and reduced human influence. While the electrical resistances of both methods are comparable mechanical testing confirms that ultrasonic welding produces more resilient and consistent joints, underscoring the benefits of automation.

Acknowledgement

The authors would like to thank dr. Beno Klopčič for his contribution in optimisation of US welding process parameters and to Marko Šubic for his help in measuring energy consumption. This work was supported by BOSCH REXROTH d.o.o. and its director Martin Andreas Hansen. This research was also financially supported by the Slovenian Research Agency under grant number P2-0270 and bilateral projects Weave N2-0328 and BI-BA/24-25-034. The project proposal was also partly supported by EU ERASMUS+ Strategic Partnership Key Action 2, numbers 2021-1-RO01-KA220-VET-000028028 (DIGIGREEN) and 2023-1-RO01-KA220-HED-000158031 (ANGIE).

References / Literatura

[1] Tušek, J. Varjenje in Sorodne Tehnike Spajanja Materialov v Neločljivo Zvezo (2014), [Welding and Related Techniques for Joining Materials into an Inseparable Bond]. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani: Ljubljana, Slovenia; ISBN 978-961-653-675-2.

[2] Olson, L.D. (1993), Welding, Brazing and Soldering; Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee: Metals Park OH, USA, Volume 6, ISBN 978-087-170-382-8.

[3] Berge, M.; Gjerdet, N.R.; Erichsen, E.S. (1982), Corrosion of silver soldered orthodontic wires. *Acta Odontol. Scand.* 40, 75–79. <https://doi.org/10.3109/00016358209041118>.

[4] Castro, R.; de Cadenet, J.J. (1975), *Welding Metallurgy of Stainless and Heat-Resisting Steels*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; p. 106.

3. Mehanička ispitivanja pokazuje da ultrazvučno zavarivanje proizvodi otpornije spojeve u poređenju sa ručnim lemljenjem, sa konzistentnijim rezultatima, naglašavajući prednosti automatizacije.

Ukratko, ultrazvučno zavarivanje nudi značajne prednosti u odnosu na lemljenje, jer je energetski efikasnije i brže u stvaranju spojeva, sa većom konzistentnošću i smanjenim ljudskim uticajem. Dok su električni otpori obe metode uporedivi, mehaničko testiranje potvrđuje da ultrazvučno zavarivanje proizvodi elastičnije i konzistentnije spojeve, naglašavajući prednosti automatizacije.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju dr. Beno Klopčiču za doprinos u optimizaciji parametara procesa zavarivanja u SAD i Marku Šubiću za pomoć u merenju potrošnje energije. Ovaj rad je podržao BOSCH REKSROTH d.o.o. i njegov direktor Martin Andreas Hansen. Ovo istraživanje je takođe finansijski podržala Slovenačka agencija za istraživanje u okviru granta broj P2-0270 i bilateralnih projekata Weave N2-0328 i BI-BA/24-25-034. Predlog projekta je takođe delimično podržan od strane EU ERASMUS+ strateškog partnerstva Ključne akcije 2, brojevi 2021-1-RO01-KA220-VET-000028028 (DIGIGREEN) i 2023-1-RO01-KA220-HED-0001G58031 (ANGIE).

[5] Rogers, O.W. (1979), A metallographic evaluation of the stainless steel-silver solder joint. *Aust. Dent. J.*, 24, 13–16.

[6] Phillips, R. (1973), *Skinner's Science of Dental Materials*, 7th ed.; W.B. Saunders Company: Philadelphia, USA, p. 646. ISBN 978-072-167-234-2.

[7] Gardiner, J.H.; Aamodt, A.C. (1969), Some aspects of soldering stainless steel. *Dent. Practit.* 20, 65–76.

[8] Laird, W.R.E.; von Fraunhofer, J.A. (1972), Silver soldered joints in stainless steel. A comparative evaluation of techniques. *Br. Dent. J.*, 132, 263–267.

[9] Takahashi, S. (1968), Electrochemical processes in oral tissues. *Int. Dent. J.*, 18, 823–833.



- [10] Kumar, N.; Maurya, A. (2022), Development of lead free solder for electronic components based on thermal analysis. *Mater. Today Proc.*, 62, 2163–2167. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.358>.
- [11] Popov, V.V.; Grilli, M.L.; Koptuyug, A.; Jaworska, L.; Katz-Demyanetz, A.; Klobčar, D.; Balos, S.; Postolnyi, B.O.; Goel, S. (2021), Powder bed fusion additive manufacturing using critical raw materials: A review. *Materials*, 14, 909. <https://doi.org/10.3390/ma14040909>.
- [12] BRANSON Ultrasonics Corporation. (2011), VersaGraphix Controller 2032S Instruction Manual EDP DCM00059-01 Rev. 3; BRANSON Ultrasonics Corporation: Danbury, CT, USA.
- [13] Otsuka, Y. (2014), Wiring Harness and a Method for Producing the Same, and Method for Connecting Insulated Wires. U.S. Patent 8,921,696 B2; U.S. Patent and Trademark Office: Washington, DC, USA.
- [14] Blumenthal, M.D., (2013), Methods for Forming Superconducting Joints. UK patent Application. GB 2498961A.
- [15] Osamo, S., (2010), Wiring Harness and a Method for Producing the Same, and Method for Connecting Insulated Wires. JP patent Application JP2010044887A.
- [16] Zhou, L.; Min, J.; He, W.; Huang, Y.; Song, X., (2018), Effect of welding time on microstructure and mechanical properties of Al-Ti ultrasonic spot welds. *J. Manuf. Process.* 33, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.013>.
- [17] Shakil, M.; Tariq, N.; Ahmad, M.; Choudhary, M.; Akhter, J.; Babu, S., (2013), Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints. *Mater. Des.* 55, 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.074>.
- [18] Lee, S.S.; Kim, T.H.; Hu, S.J.; Cai, W.W.; Abell, J.A.; Li, J., (2013), Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs. *J. Manuf. Sci. Eng.* 135, 21004. <https://doi.org/10.1115/1.4023364>.
- [19] Logar, A.; Klobčar, D.; Nagode, A.; Trdan, U.; Černivec, G.; Sharma, A., (2024), Advanced Analysis of the Properties of Solid-Wire Electric Contacts Produced by Ultrasonic Welding and Soldering. *Materials*, 17, 334. <https://doi.org/10.3390/ma17020334>.
- [20] Energy Balances—Energy—Eurostat. Available online, (2022): <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>
- [21] SH-WIRES. Product Datasheet SHTherm® 210 [Internet]. Germany: © 2020 Synflex Elektro GmbH; 2023. Available online: <https://www.sh-wire.de/en/applications/product-range/shthermr-210/datasheet/shthermr-210-1-375/>
- [22] SAXONIA Technical Materials. Technical Data Sheet BrazeTec S 15 [Internet]. Germany: Saxonia; (2023). Available online: http://www.technical-materials.com/Brazetec/en/datenblaetter/show_TD_BrazeTec_S15_EN.pdf
- [23] Davis, J.R., (2001), Copper and Copper Alloys; Prepared under the Direction of the ASM International Handbook Committee: Metals Park OH, USA, ISBN 087-170-726-8
- [24] OWELD. Gas Generator Model 10000HD [Internet]. Italy: OXYWELD S.r.l.; (2024). Available online: <https://oweld.com/product/gas-generator-model-10000ep-2/>
- [25] Metrel. Power Q4 [Internet]. Slovenia: Metrel D.O.O.; (2024) Available online https://www.metrel.si/assets/Metrel/Navodila_instrumentov/Instruments/MI_2792_PowerQ4_Plus/Deu/MI_2792_PowerQ4_Plus_DEU_Ver_1.0_20_751_918.pdf Standard No. M 3455; Ultrasonically Welded Electric Cables. 2014; MAN: Munich, Germany.
- [26] Standard No. M 3455; (2014), Ultrasonically Welded Electric Cables. MAN: Munich, Germany.



Vojin Milić ^{1,a}, Andrija Drča ^{2,b}

PREGLED NOVE UREDBE O GRAĐEVINSKIM PROIZVODIMA I KONSTRUKCIJAMA 2024/3110

REVIEW OF THE NEW CONSTRUCTION PRODUCTS REGULATION 2024/3110

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received

Maj 2025

Rad prihvaćen / Paper accepted

Avgust 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ TUV Rheinland Intercert Kosovska 10, 11000 Beograd, Srbija

² SGS Beograd, Jurija Gagarina 7b, 11070 Beograd, Srbija

email / ORCID ID:

^a vojinnwr@gmail.com / 0009-0001-5300-0755

^b / 0009-0009-0782-4866

Ključne reči: građevinski proizvodi, čelične konstrukcije, ekološka održivost

Keywords: civil engineering, steel structures, environmental sustainability

Rezime

Nova Uredba o građevinskim proizvodima 2024/3110 predstavlja ključni regulatorni okvir Evropske Unije, kojim se definišu koje uslove treba da ispuni proizvođač da bi plasirao proizvod na tržište unutar granica Evropske Unije. U odnosu na sadašnju Uredbu 305/2011, nova Uredba stavlja akcenat na ekološke aspekte, cirkularnu ekonomiju i smanjenja uticaja građevinskih proizvoda na životnu sredinu, što je u skladu sa ciljevima Evropskog zelenog plana. U radu se analizira sadržaj nove Uredbe, njena implementacija i tranzicija u odnosu na sadašnju Uredbu.

Abstract

The new Regulation on construction products 2024/3110 represents the key regulatory framework of the European Union, which defines what conditions must be met by the manufacturer in order to place the product on the market within the borders of the European Union. In relation to the current Regulation 305/2011, the new Regulation emphasizes ecological aspects, circular economy and reducing the impact of construction products on the environment, which is in line with the goals of the European Green Plan. The paper analyzes the content of the new Regulation, its implementation and transition in relation to the current Regulation.



1. Uvod

Uredba o građevinskim proizvodima (Construction Products Regulation – CPR) predstavlja jedan od temeljnih regulatornih akata Evropske unije u oblasti građevinarstva. Njena primarna funkcija ogleda se u uspostavljanju bitnih zahteva u pogledu bezbednosti, zaštite i zdravlja korisnika, tehničkih performansi i uticaja na životnu sredinu, sa ciljem da se obezbedi nesmetana cirkulacija građevinskih proizvoda u okviru jedinstvenog tržišta Evropske unije. Na taj način Uredba o građevinskim proizvodima ne samo da stvara uslove za fer tržišnu konkurenciju, već i doprinosi zaštiti krajnjih korisnika i unapređenju kvaliteta izgrađenog okruženja.

Prvobitna verzija Uredbe o građevinskim proizvodima usvojena je 2011. godine kao pravni okvir koji je, kroz standardizovane smernice, omogućio uporedivost i transparentnost građevinskih proizvoda među državama članicama. Međutim, ubrzani razvoj građevinske industrije, strožiji ekološki zahtevi i potreba za održivim razvojem nametnuli su potrebu za njenim sveobuhvatnim ažuriranjem. Iz tog razloga, Evropska unija je 27. novembra 2024. godine usvojila revidiranu verziju Uredbe 2024/3110, kojom se dodatno naglašava značaj održivosti, energetske efikasnosti i transparentnosti u celokupnom životnom ciklusu građevinskih proizvoda. Pored toga, uočeni nedostaci prethodne verzije su uklonjeni uvođenjem novih priloga poput zahteva proizvoda (Prilog III), opštim informacijama o proizvodu (Prilog IV), kao i detaljnijeg definisanja bitnih zahteva (Prilog I) i sistema ocene i verifikacije (Prilog IX). Uredba 2024/3110 uvodi kao novost, u skladu sa razvojem tržišta, deo posebno vezan za 3D štampane proizvode.

Revidirana uredba objavljena je u službenom listu Evropske unije 18. decembra 2024. godine i stupila je na snagu 7. januara 2025. godine, a krenuće da se primenjuje 8. januara 2026. godine [1]. Njome su jasno definisane ključne oblasti performansi građevinskih proizvoda, uvedena harmonizovana pravila za CE označavanje, te je propisana obaveza država članica da obezbede doslednu primenu bezbednosnih i ekoloških standarda. Time se Uredba 2024/3110 pozicionira ne samo kao regulatorni instrument, već i kao strateški mehanizam kojim se podržava ostvarenje ciljeva evropske politike zelene tranzicije i unapređenje konkurentnosti građevinskog sektora na globalnom tržištu.

2. Izmene uredbe

Revidirana Uredba o građevinskim proizvodima 2024/3110 uvela je niz značajnih mera koje proizvođači moraju da primenjuju [2]:

- Izjava o performansama i usaglašenosti (DoPC)
- Održivost i ekološki aspekti
- Digitalni pasoš proizvoda (DPP)
- Označavanje proizvoda – CE oznaka, profesionalna upotreba i ekološka održivost
- Dostupnost rezervnih delova

Izjava o performansama i usaglašenosti (DoPC) – Član 13, 15 i prilog 5 uredba (EU) 2024/3110.

Pre stavljanja proizvoda na tržište, proizvođač je obavezan da pripremi izjavu o performansama i usaglašenosti (Declaration of Performance and Conformity – DoPC). Ovaj dokument sadrži sažet prikaz performansi građevinskog proizvoda, podatke o proizvođaču, ostalim uključenim telima, harmonizovanu tehničku specifikaciju čiji obim obuhvata predmetni proizvod, sistem ocenjivanja i verifikacije, kao i potvrdu njegove usklađenosti sa važećim pravilima i zahtevima. DoPC ima karakter pravno obavezujućeg akta, kojim proizvođač preuzima punu odgovornost za svoj proizvod. Dokument ujedno predstavlja osnovu za dodelu CE oznake, pri čemu je izričito zabranjeno korišćenje bilo kog drugog obeležja osim CE oznake. Proizvođač je dužan da obezbedi DoPC u elektronskom obliku, tako da bude lako dostupan, mašinski čitljiv i jasno povezan sa konkretnim proizvodom. U narednim godinama, ovaj dokument će postati integralni deo Digitalnog pasoša proizvoda (Digital Product Passport – DPP).

3. Ekološka održivost

Proizvođači će postepeno biti obavezni da u izjavi o performansama i usaglašenosti (DoPC) navedu ekološke performanse proizvoda tokom njegovog životnog ciklusa za unapred definisane ključne ekološke karakteristike, propisane Prilogom II (videti sliku 1).

Prilikom izračunavanja ekoloških performansi životnog ciklusa proizvoda koji se ponovo koristi ili preradjuje, događaji koji su se desili pre poslednje demontaže proizvoda ne moraju biti uključeni. Postoji mogućnost da novi proizvodi u DoPC-u navedu sposobnost za preradu i ponovnu upotrebu u okviru proizvodnje, pakovanja i rukovanja tokom celog životnog ciklusa. U zavisnosti od kategorije proizvoda, označavanje ekološke održivosti (environmental sustainability labelling) može postati obavezno [2].



Slika 1. Unapred određene bitne karakteristike koje će postepeno biti obavezne za deklarisanje – Prilog II, Uredba (EU) 2024/3110.

Figure 1. Pre-determined essential characteristics that will gradually be mandatory for declaration - Annex II, Regulation (EU) 2024/3110.

3.1 Digitalni pasoš proizvoda (Digital Product Passport – DPP)

U roku od 18 meseci od stupanja na snagu relevantnih delegiranih akata, proizvođači će biti obavezni da za proizvode koji su pokriveni harmonizovanim tehničkim specifikacijama prema CPR 2024/3110 obezbede Digitalni pasoš proizvoda (DPP).

DPP će sadržati Izjavu o performansama i usaglašenosti (DoPC), uputstva za upotrebu i informacije o bezbednosti, tehničku dokumentaciju, pri čemu će podaci biti povezani putem nosilaca podataka (npr. bar-kod, tag), sa ciljem da informacije budu dostupne, razumljive i sledljive tokom čitavog lanca vrednosti na digitalizovan način. Opšti okvir i koncept DPP-a definisan je kroz Uredbu o ekološkom dizajnu za održive proizvode (Ecodesign for Sustainable Product Regulation – ESPR).

3.2 Označavanje proizvoda CE znak

- CE oznaka će biti u skladu sa opštim principima Uredbe 765/2008.
- CE oznaka se sme postaviti samo na proizvode za koje je izrađena Izjava o performansama i usaglašenosti (DoPC) i koja potvrđuje da je proizvod prošao procenu svojih ključnih karakteristika, kao i da je

proizvod u celosti u skladu sa važećim zahtevima CPR 2024/3110.

- Određeni proizvodi koji zahtevaju stručnost za upotrebu moraju biti jasno označeni natpisom: „Samo za profesionalnu upotrebu“.
- Za neke kategorije proizvoda, posebno proizvode namenjene krajnjim potrošačima, Evropska komisija može utvrditi specifično označavanje ekološke održivosti, koje će se zasnivati na procenjenim performansama proizvoda.

3.3 Dostupnost rezervnih delova

Za neke kategorije proizvoda, Evropska komisija može doneti delegirane akte kojima će proizvođači biti obavezni da obezbede dostupnost rezervnih delova na tržištu za proizvode koji nisu uobičajeno dostupni.

Cilj ove mere je osiguranje dugovečnosti proizvoda i promocija cirkularne ekonomije, gde se proizvodi popravljaju i održavaju umesto da se odbacuju.

Kada se primeni takav delegirani akt, proizvođač je dužan da obezbedi dostupnost rezervnih delova u periodu od 10 godina nakon što je poslednji proizvod te vrste plasiran na tržište, osim ako nije drugačije navedeno.

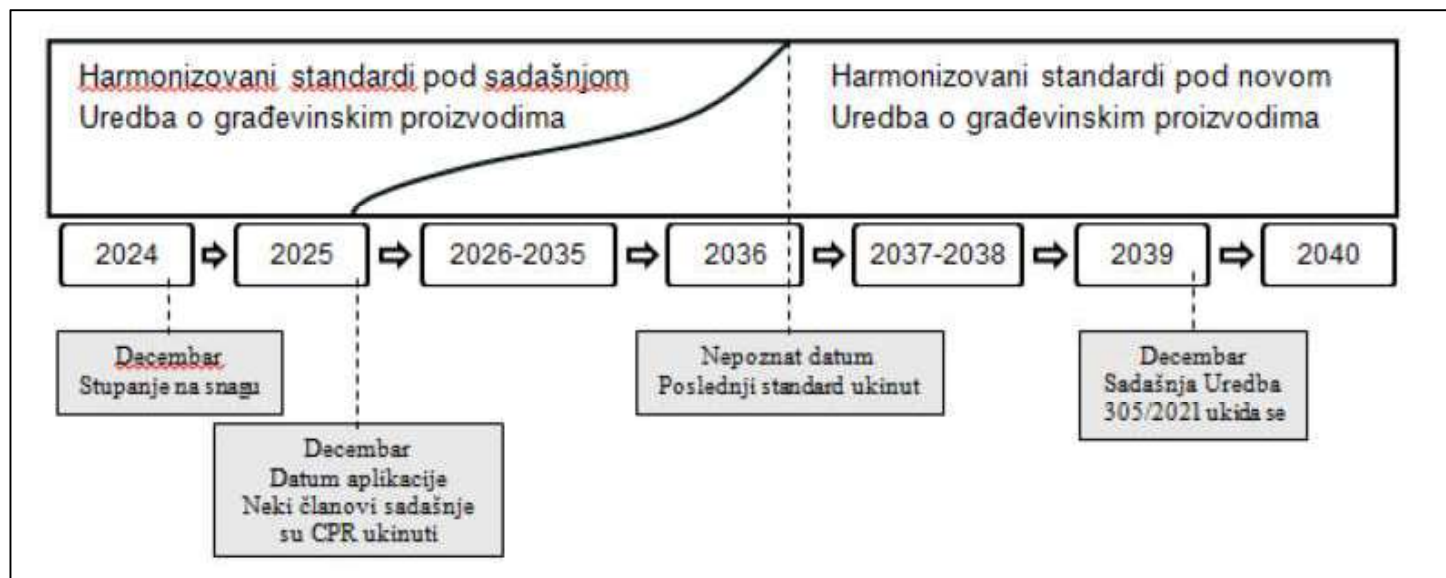


3.4 Tranzicija - harmonizovanih specifikacija

Primena nove Uredbom i tranzicija sa stare Uredbe o građevinskim proizvodima biće postepen u periodu od 15 godina (slika 2). Očekuje se da će oko 400 standarda biti revidirano radi usaglašavanja sa novom uredbom. Zbog obima

ovog posla, predviđen je produženi period implementacije, koji će trajati do 8 januara 2040. godine [3].

Članom 95 nove Uredbe propisana su odstupanja i prelazne odredbe.



Slika 2. Tranzicija sadašnje Uredbe 305/2011 na novu Uredbu 2024/3110

Figure 2. Transition of the current Regulation 305/2011 to the new Regulation 2024/3110

Uredba (EU) br. 305/2011 stavlja se van snage sa dejstvom od 8. januara 2026. godine, sa izuzetkom sledećih članova, i zamenjuje se odgovarajućim članovima Uredba (EU) 2024/3110 opisanim u prilogu 11. Sistem AVCP (Procena i verifikacija stalnost performansi) zamenjen je AVS sistemom (sistem procene i verifikacije). Sistemi 1+, 1, 2+ i 4 ostaju neizmenjeni, sistem 3 je dopunjen novim zahtevima i uveden je potpuno novi sistem 3+ i primenjuje se za procenu ekološke

4. Zaključak

Uredba o građevinskim proizvodima 2024/3110 donosi bitne dopune, izmene i sasvim nove delove prateći napredak i razvoj tržišta i time ispunjava nove zahteve u pogledu novih načina proizvodnje, održivosti, ekološkog otiska, zdravlja i bezbednosti korisnika i digitalizacije.

Bitni zahtevi proizvoda, sistemi procene i verifikacije, kao i izjava o performansama i usaglašenosti, su tačnije definisani i prošireni u skladu sa nastalim potrebama što vodi većoj transparentnosti, lakšem razumevanju i jednostavnijoj primeni ove Uredbe. Opšte informacije o proizvodu, uputstva za upotrebu i bezbednosne informacije (Prilog IV) definišu jasno

održivosti. Sami sistemi detaljnije opisani što ih čini jasnijim. Prilog IX nove Uredbe, pored definisanja sistema procene i verifikacije ističe određena pravila koja se odnose na sve ili samo neke sisteme. Novi EN 1090-1 biće objavljen do 15.11.2025. (bez harmonizacije), nakon čega će se primenjivati u okviru stare Uredbe 305/2011. Standard već sadrži ekološke aspekte, koji će se za sada testirati na dobrovoljnoj osnovi [4].

4. Conclusion

The Construction Products Regulation 2024/3110 introduces significant additions, amendments, and entirely new sections to keep pace with market progress and development, thereby fulfilling new demands related to novel production methods, sustainability, environmental footprint, user health and safety, and digitalization. Essential product requirements, assessment and verification systems, as well as the declaration of performance and conformity, are more precisely defined and expanded in accordance with emerging needs. This leads to greater transparency, easier understanding, and simpler application of this Regulation.



šta proizvod mora da ispuni u pogledu dostupnosti informacije, uputstvima i bezbednosnim informacijama pružaju korisnicima lakšu upotrebu proizvoda i smanjenje rizika.

Primenom Uredbe o građevinskim proizvodima, odnosno pravila propisanih ovom Uredbom, obezbeđuje se značajno bolja transparentnost, sledljivost, bezbednost i dugovečnost proizvoda u poređenju sa starom verzijom.

Period tranzicije daje proizvođačima vreme da se prilagode novim propisima i time pospeše kretanje kvalitetnijih proizvoda na tržištu koji ispunjavaju ekološke aspekte i aspekte održivosti, čime se povećava konkurentnost. Razvoj novih rešenja, a takođe i samih proizvoda postaje neminovan u ovom periodu.

General product information, instructions for use, and safety information (Annex IV) clearly define what a product must meet in terms of information availability, providing users with easier product use and reduced risks through instructions and safety information.

The application of the Construction Products Regulation, i.e., the rules prescribed by this Regulation, ensures significantly better transparency, traceability, safety, and longevity of products compared to the old version.

The transition period gives manufacturers time to adapt to the new regulations and thereby promote the movement of higher-quality products on the market that meet ecological and sustainability aspects, which increases competitiveness. The development of new solutions, as well as the products themselves, becomes inevitable during this period.

Literatura / References

[1] OneClick LCA. *Vodič Uredbe o građevinskim proizvodima*. Pristupljeno 04.08.2025. <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/revise-d-construction-products-regulation-to-include-epd-data>

[2] Evropska komisija. *Uredba o građevinskim proizvodima 2024/3110*. Pristupljeno 06.07.2025. <https://eur-lex.europa.eu>.

[3] Institut za Standardizaciju Srbije. *Usvojena nova Uredba EU o građevinskim proizvodima*. Pristupljeno 04.08.2025. https://iss.rs/sr_Latn/usvojena-nova-uredba-eu-o-gradjevinskim-proizvodima_p1544.html

[4] Makowka A. (2025, maj). *Nova EU Uredba o građevinskim proizvodima, prvi pregled*. TUV Rheinland konferencija Ex Ex Exchange, Zabrze Poljska.

VESTI



NEWS

ICWET 2026: 20. Međunarodna konferencija o inženjerstvu i tehnologiji zavarivanja 30-31. mart 2026. u Parizu, Francuska

Međunarodna konferencija o inženjerstvu i tehnologiji zavarivanja ima za cilj da okupi vodeće naučnike, istraživače i mlade istraživače kako bi razmenili i podelili svoja iskustva i rezultate istraživanja o svim aspektima inženjerstva i tehnologije zavarivanja. Takođe pruža vrhunsku interdisciplinarnu platformu za istraživače, praktičare i edukatore da predstave i razgovaraju o najnovijim inovacijama, trendovima i problemima, kao i o praktičnim izazovima i rešenjima koja su usvojena u oblastima inženjerstva i tehnologije zavarivanja.

Potencijalni autori se ljubazno pozivaju da doprinesu i pomognu u oblikovanju konferencije putem slanja svojih istraživačkih apstrakata, radova i e-postera. Takođe, visokokvalitetni istraživački doprinosi koji opisuju originalne i neobjavljene rezultate konceptualnog, konstruktivnog, empirijskog, eksperimentalnog ili teorijskog rada u svim oblastima inženjerstva i tehnologije zavarivanja srdačno su pozvani da se prezentuju na konferenciji. Konferencija prihvata doprinose u obliku apstrakata, radova i elektronskih postera koji se bave temama i predmetima konferencije, uključujući slike, tabele i reference za nove istraživačke materijale.

Svi podneti radovi sa konferencije biće recenzirani od strane tri kompetentna recenzenta. Recenzirani zbornici radova sa konferencije su indeksirani u Open Science Index, Google Scholar, Semantic Scholar, Zenedo, BASE, WorldCAT, Sherpa/RoMEO i drugim indeksnim bazama podataka.

Svi podneti radovi za 20. Međunarodnu konferenciju o inženjerstvu i tehnologiji zavarivanja će imati priliku da budu razmatrani za posebno izdanje časopisa [Welding Engineering and Technology](#). Određeni broj odabranih radova u punom tekstu sa visokim značajem, takođe će biti razmatrani za posebna izdanja časopisa. Izbor radova biće sproveden tokom procesa recenzije, kao i u fazi prezentacije na konferenciji. Podneti radovi ne smeju biti u razmatranju ni u jednom drugom časopisu ili publikaciji. Konačna odluka o izboru radova biće doneta na osnovu izveštaja recenzenata od strane gostujućih urednika i glavnog urednika zajedno. Odabrani radovi u punom tekstu biće objavljeni onlajn besplatno. Izvor: <https://waset.org/conferences-in-march-2026-in-paris/program>

Zoran Odanović



72. GODIŠNJA SKUPŠTINA DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI

Beograd, 26.06.2024.

Redovna 72. godišnja skupština DUZS - Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji održana je 30. juna 2025. godine, u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine; izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2024 - 2025. godine. Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2024 - 2025. godine. Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2024. godini. Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2025 - 2026. godinu; diskusija i usvajanje
8. Izmena i dopuna Statuta Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji
9. Razno



U okviru izveštaja o radu, između ostalog, prezentovano je i poslovanje časopisa „Zavarivanje i zavarene konstrukcije“ i konstatovano da su tokom 2024. g. na vreme izašla sva četiri broja časopisa u ukupnom obimu od 192 strane. Status časopisa je ostao nepromenjen i za 2024. godinu je M-52: Istaknuti nacionalni časopis. Počev od broja 1 časopisa u 2025. godini potpisan je ugovor o suizdavaštvu sa Tehnološko-metalurškim fakultetom (TMF) u Beogradu. Promenjena je i štamparija, tako da se štampanje časopisa počev od broja 1 za 2025. godinu obavlja u štampariji TMF. Pokrenuto je i elektronsko izdanje časopisa (sajt časopisa <https://wvsjournal.org.rs/>).



U izveštajnom periodu (2 - 5. oktobar 2024. godine), održano je 33. Savetovanje sa međunarodnim učešćem ZAVARIVANJE 2024 / WELDING 2024 u organizaciji DUZS i tehničkoj organizaciji agencije BBN Congress Management u hotelu Vrnjačke Terme u Vrnjačkoj Banji.

Takođe, bilo je reči i o međunarodnom takmičenju mladih zavarivača koje se održava u septembru 2025. godine u Nemačkoj na koje je DUZS zvanično prijavljen.

Što se tiče DUZS-CertPers-a, napomenuto je da je 2024. godine započelo 8 međunarodnih kurseva u svih 5 ATB centara. Od ove godine, pored ATB Zavoda za zavarivanje, ATB Instituta GOŠA i ATB MFNiša i ATB Institut za zavarivanje u Tuzli ima u svom obimu kurs za međunarodne inspektore zavarivanja.



Nadzorni odbor je na osnovu razmatranja finansijskog i materijalnog poslovanja Društva, odnosno uvida u finansijski izveštaj DUZS po godišnjem računu za 2024. godinu, konstatovao da nije uočio nepravilnosti u radu. V. Grabulov je u vezi sa izveštajem o finansijskom poslovanju konstatovao da postoji značajan rast troškova globalno u društvu i da treba razmotriti da li i kako prihodi udruženja mogu da prate taj rast. Predlog mera – štednja, povećanje cena usluga, povećanje aktivnosti udruženja.

Izmene i dopune Statuta Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji inkorporirane su u članovima 7, 24, 27, 28, 29 i 33 Statuta i ovlašćenja za zastupanje DUZS su prešla sa Predsednika društva na Sekretara DUZS. Shodno izmenama i dopunama Statuta DUZS tačnije članom 24 stavom 2 predviđeno je da Upravni odbor broji sedam članova. Šest članova biraju se iz različitih organizacija na mandat od četiri godine. Sedmi član Upravnog odbora je Izvršni rukovodilac DUZS-CertPers. Mandat Izvršnog rukovodioca DUZS-CertPers je šest godina, u skladu sa članom 32 Statuta, dok je stavom 7 predviđeno da je Sekretar Upravnog odbora Izvršni rukovodilac DUZS-CertPers koga bira Odbor DUZS-CertPers. Sekretar Upravnog odbora je Sekretar Društva, kao i lice ovlašćeno za zastupanje Društva.

Izveštaji o radu DUZS i DUZS-CertPers, izveštaj o finansijskom poslovanju, planovi rada usvojeni su jednoglasno. Takođe je jednoglasno doneta odluka o usvajanju predloženih izmena i dopuna Statuta Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji.



**Internacionalni inženjeri zavarivanja (IWE) / Evropski inženjeri zavarivanja (EWE);
Internacionalni tehnolozi zavarivanja (IWT) / Evropski tehnolozi zavarivanja (EWT);
Internacionalni inspektori zavarivanja (IWI-C)**

kojima je diplome izdao DUZS-CertPers mogu javno da prikažu nivo kvalifikacije na relevantnim dokumentima korišćenjem IIW/EFW pečata izdatim od strane DUZS-CertPers



Na zahtev kandidata koji imaju IWE / IWT / IWI-C diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i IIW pečate (izdaju se na osnovu IIW diploma). Takođe, na zahtev kandidata koji imaju IWE ili IWT diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i evropske ekvivalentne diplome EWE/EWT i EWF pečat (izdaje se na osnovu EWF diplome). **Ukoliko ste zainteresovani za izdavanje EWF diplome/pečata ili IIW pečata, ZAHTEV(E) je potrebno popuniti i dostaviti sekretarijatu DUZS-CertPers – a.** Zahteve za izdavanje pečata možete preuzeti na sajtu DUZS: www.duzs.org.rs tj. putem sledećih linkova:

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-izdavanje-IIW-pecata_IWE-IWT-IWI-C.pdf

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-dobijanje-EWF-diplome_pecata.pdf

Informacije:

+ 381 (11) 2420-652

duzs011@gmail.com



INFORMATION FOR AUTHORS

in submitting manuscripts to journal
WELDING AND WELDED STRUCTURES

Welding & Welded Structures (Zavarivanje i zavarene konstrukcije) is the official quarterly review of the Serbian Society for Advancement of Welding. The Journal publishes reports on the latest developments in all aspects of welding, joining, cutting and related technologies. In addition to its coverage of all the widely used welding and construction fabrication processes, the journal also discusses welding metallurgy, testing and inspection of welds, new publications and standards, operator training and education, health and safety matters, new equipment and consumables.

The journal provides comprehensive information of Serbian Society for Advancement of Welding activities.

The journal *Welding & Welded Structures* publishes original scientific papers, preliminary communications, review and professional papers. Papers are published in Serbian or English.

Manuscript should be typed on one side only of A4 paper in Arial font, 10 point, fully justified. Ample margins should be provided, not less than 20 mm. The pages should be numbered. The normal maximum of paper is 10 single spaced typewritten pages, with tables and figures. The typescript should be presented in the order: *title page, text, appendix, acknowledgment, references, tables and figures*.

Title page

The title page should contain:

the title of the paper - should be brief, specific informative and not exceeding ten words,

the name(s) of the author(s), establishment(s) and the addresses,

keywords - not exceeding five words,

abstract - not more than 250 words. The abstract should present a concise summary of the objectives, content, and conclusions of the paper. It should be intelligible in itself without reference to the paper, so no mention must be made of any figures, tables, or bibliographical references.

Text

For the main text it is important to maintain a logical sequence, splitting text into paragraphs with different headings. Clear differentiation should be made between the headings of sections, subsections, etc. It is suggested to organize and divide main text into the following headings:

introduction - short statement giving relevant background, purpose and scope of the work,

experimental - giving materials, methods, process and equipment used in solving the problem,

results - discussion - evaluation and interpretation of the data and facts, **conclusions** - short evaluation and interpretation of the performed work,

Appendix, acknowledgment - as required.

References

References should be numbered serially and the numbers should be typed within square brackets. The references should be set out in a list, numbered according to their appearance in the text. For the sake of uniformity and literature searching, the format in accordance of the ISO 690 must be used.

Equations, tables and figures, should all be numbered serially throughout the text, and referred to in the text. Equations should be typed in fonts for symbols, with explained meanings of the symbols.

Tables should be simple as possible. Each table should have a descriptive heading at the top. All figures must be submitted in a form suitable for reproduction, in a high resolution, of high contrast, clear, black and white.

Caption should be placed below the figure. In preparing diagrams, line drawings have to provide high resolution computer printouts. Drawings and lettering size should permit 50% reduction in the final version.

Units Authors are explicitly requested to submit their papers using SI units.

The volume of the text is up to 10 pages of A4 format. Manuscripts submitted to the Journal will be reviewed.

Authors are obliged to prepare the text of the paper according to the instructions and submit it by e-mail in MS Word (docx) and Adobe (pdf) format to the e-mail address duzs011@gmail.com.

Authors are requested to provide e-mail address and phone number for rapid communications, if necessary.

Manuscripts should be submitted to Editorial Board:

Welding & Welded Structures

Zavarivanje i zavarene konstrukcije

Grčića Milenka 67

11000 Belgrade

Serbia

tel. / fax + 381 (11) 2420-652

E-mail: duzs011@gmail.com

www.wwsjournal.org.rs

Uredništvo časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2025**

	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	-	45 000	28 000	19 000	12 000
	kolor	120 000	85 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljanje 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 / CoreIDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW);
 - izrada filma sa CD: 10% od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, (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 2025

	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	-	1000	500	400	300
	colour	3000	2000	-	-	-

- 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 / CoreIDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

SIGMA LAB

EDC D.O.O. HRVATSKA

TMS CEE D.O.O BEOGRAD

- | | |
|---|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2025. godinu | 5.000 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2025. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%): | |
| ▪ cena pojedinačnog broja..... | 1.150 dinara |
| ▪ godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... | 3.520 dinara |
| 3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%) | |
| a) u slobodnoj prodaji: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2024. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2024. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 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 (izdanja su i z 2012. godine) | 6.750 dinara |