

ZBORNİK RADOVA

- **PREDGOVOR**
- **SPONZORI**
- **POČASNI ODBOR**
- **NAUČNO-STRUČNI ODBOR
„PROCESINGA 2010“**
- **ORGANIZACIONI ODBOR
„PROCESINGA 2010“**
- **NAUČNO-STRUČNI ODBOR
„ZAVARIVANJA 2010“**
- **ORGANIZACIONI ODBOR
„ZAVARIVANJA 2010“**
- **ORGANIZACIONI I
STRUČNI ODBOR
„IBR-a 2010“**
- **ORGANIZATORI**
- **PROGRAM**
- **SADRŽAJ**

ZBORNİK RADOVA

Dvadeset treći međunarodni kongres o procesnoj industriji

PROCESING 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem

ZAVARIVANJE 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem

IBR 2010

(Tara, 2-4 jun 2010)

Izdavači

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS)

Sekcija za procesnu tehniku

Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd

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

Srpsko društvo za ispitivanje
bez razaranja (SDIBR)
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd

Glavni urednik

Ilija Kovačević, dipl. inž.

Uređivački odbor

dr Dejan Radić, dipl. inž.,

dr Vencislav Grabulov, dipl. inž.,

mr Đurđija Čašić, dipl. inž.

Kompjuterska priprema

„Kvartet V“, Beograd

Štampa

„NO-KAČI“, Beograd

Tiraž

400 primeraka

*Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije i
Inženjerska komora Srbije finansijski su pomogli
organizovanje savetovanja „Zavarivanje 2010“*

PREDGOVOR

Pozitivni komentari učesnika, odjek iz privrede, promovisanje struke kroz osamnaest plenarnih predavanja od ukupno sto četrnaest, kao i impozantan broj od tri stotine učesnika iz zemlje i inostranstva, ponovo su udružili, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS) i Srpsko društvo za ispitivanje bez razaranja (SDIBR) u želji da zajednički organizuju svoje tradicionalne skupove i da na taj način zajednički ostvaruju postavljene ciljeve:

- *objedinjeno razmatranje komplementarne problematike („Procesinga 2010“, „Zavarivanja 2010“ i „IBR 2010“);*
- *da na jednom mestu, u isto vreme i sa jednom kotizacijom stručnjaci jednog preduzeća učestvuju na tri respektabilna naučno-stručna skupa;*
- *dopunjavanje tematskih oblasti koje omogućava učesnicima da slede logičan niz u životu jednog proizvoda (projekta, izrade - zavarivanja, ispitivanja, puštanja u rad, održavanja, popravke itd.);*
- *da radovi koji se pripremaju za skup budu sa tematikom iz svakodnevnog inženjerskog rada, kako bi se omogućilo učesnicima da reše ili dobiju ideju kako da reše konkretne probleme iz prakse;*
- *povećanje broja učesnika i članstva u SMEITS-u, DUZS-u i SDIBR-u;*
- *međusobno povezivanje učesnika, privrednih društava i organizatora kongresa odnosno savetovanja u cilju promovisanja struke i stalnog poslovnog kontakta u periodima između dva skupa;*
- *da zajedničko savetovanje postane embrion organizovanja budućih regionalnih skupova.*

Sa željom da kvalitet rada skupa podignu na viši nivo, organizacioni i naučno-stručni odbori sva tri skupa su nakon prispeća i razvrstavanja radova napravili plan skupa koji podrazumeva zajednička plenarna izlaganja svih radova u istoj sali, osim šest radova za koje su se naučno-stručni odbori odlučili da budu prezentirani na posterima.

Na ovom disku su kompletni radovi pisani za sva tri skupa. Disk se uručuje učesnicima „trojnog“ skupa zajedno sa štampanim zbornikom rezimea (na srpskom i engleskom) tih radova. Pored osnovnih informacija o skupu - naziva pokrovitelja i sponzora, sastava odbora, programa skupa i oglasnog dela, na disku je i prednacrt „Pravilnika o tehničkim uslovima za obavljanje delatnosti punjenja, transporta, skladištenja i distribucije boca sa tehničkim gasovima“, kome je u programu skupa posvećen okrugli sto.

U Beogradu, maja 2010.

*ORGANIZACIONI ODBORI
„Procesinga 2010“,
„Zavarivanja 2010“,
„IBR 2010“*

Dvadeset treći međunarodni kongres
o procesnoj industriji
PROCESING 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
ZAVARIVANJE 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
IBR 2010

održavaju se pod pokroviteljstvom
Ministarstva rudarstva i energetike
Republike Srbije

Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije
Ministarstva ekonomije i regionalnog razvoja Republike Srbije
Sekretarijata za energetiku i mineralne
sirovine AP Vojvodine
Privredne komore Srbije
Inženjerske komore Srbije

SPONZORI



BACCO

Beograd



delta inženjering

Beograd



AIR LIQUIDE

WELDING™

Rumunija



Zagreb, Hrvatska



**EVEREST
SERVICES**

Beograd



Beograd



Bečež



Beograd



Beograd



Čuprija



Novi Sad



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd

ZAVOD ZA ZAVARIVANJE a.d

POČASNI ODBOR

Ernst Bode	Messer Tehnogas , Beograd
Marinko Bokić	EuroGas , Subotica
Nicolae Crunteanu	Ductil - Air Liquide Welding , Rumunija
Miroslav Cvetičanin	Remming , Novi Sad
Branko Cvetković	Bacco , Beograd
Vencislav Grabulov	Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji , Beograd
Branko Grbić	Delta inženjering , Beograd

Nenad Ilibašić *Everest services*, Beograd
Branislav Jačimović *Mašinski fakultet*, Beograd
Aleksandar Jakovljević *JP EPS*, Beograd
Slobodan Janjušević *Kirka - SURJ*, Beograd
Slobodan Macedonić *Linde Gas Srbija - Industrija gasova*,
 Bečej
Tomislav Papić *Sekretarijat za energetiku APV*,
 Novi Sad
Milutin Prodanović *Ministarstvo rudarstva i energetike RS*,
 Beograd
Dragoljub Radojičić *Srpsko društvo za ispitivanje bez*
razaranja, Beograd
Milena Radujković *ELIMP, Zagreb*, Hrvatska
Aleksandar Stanković *SAGAX*, Beograd
Goran Sofronić *Zavod za zavarivanje*, Beograd
Miodrag Stojiljković *SMEITS*, Beograd
Slobodan Stošić *MIP - Procesna oprema*, Čuprija
Dragoslav Šumarac *Inženjerska komora Srbije*, Beograd
Miomir A. Todorović *Privredna komora Srbije*, Beograd
Dimitrije Voronjec *Mašinski fakultet*, Beograd

NAUČNO-STRUČNI ODBOR „PROCESINGA 2010“

Gradimir Ilić *Mašinski fakultet*, Niš
Ioan Laza *Mašinski fakultet*, Temišvar, Rumunija
Slobodan Macedonić *Linde Gas Srbija*, Bečej
Dejan Radić *Mašinski fakultet*, Beograd
 (predsednik Odbora)
Miroslav Stanojević *Mašinski fakultet*, Beograd

ORGANIZACIONI ODBOR „PROCESINGA 2010“

Aleksandar Dedić *Šumarski fakultet*, Beograd
Aleksandar Enbulajev *BGA*, Beograd
Srbislav Genić *Mašinski fakultet*, Beograd
Ilija Kovačević *Pro-ING*, Beograd
 (predsednik Odbora)
Zoran Nikolić *Messer Tehnogas*, Beograd
Aleksandar Petrović *Mašinski fakultet*, Beograd
Vukašin Simeunović *Toplana*, Kraljevo
Aleksandar Stanković *SAGAX*, Beograd
Slobodan Stošić *MIP - Procesna oprema*, Čuprija
Dragomir Šamšalović *SMEITS*, Beograd
Dejan Vračar *Babcock borsig power usluge*, Beograd

NAUČNO-STRUČNI ODBOR „ZAVARIVANJA 2010“

Milica Antić *Zavod za zavarivanje*, Beograd
Katarina Gerić *FTNS*, Novi Sad
Vencislav Grabulov *Institut za ispitivanje materijala*,
 Beograd (predsednik Odbora)
Vukić Lazić *Mašinski fakultet*, Kragujevac
Zoran Odanović *Institut za ispitivanje materijala*,
 Beograd
Aleksandar Radović *DUZS*, Beograd
Aleksandar Sedmak *Mašinski fakultet*, Beograd

ORGANIZACIONI ODBOR

„ZAVARIVANJA 2010“

Vera Božić *DUZS*, Beograd
Aleksandar Đorđević *Messer Tehnogas*, Beograd
Vencislav Grabulov *Institut za ispitivanje materijala*,
Beograd
Vladimir Lilić *Weld-ing*, Beograd
(predsednik Odbora)
Branislav Lukić *Institut za zaštitu*
na radu, Novi Sad
Dragan Mišković *REFIT INŽENJERING*, Beograd
Dragan Mitić *Zavod za zavarivanje*, Beograd
Ana Nanut *HIP „Petrohemija“*, Pančevo

ORGANIZACIONI I

STRUČNI ODBOR

„IBR-a 2010“

Đurdija Čašić *Institut „Vinča“*, Beograd (predsednik
Odbora)
Ljiljana Dunderski *JP „Srbija gas“*, Zrenjanin
Aleksandar Jakovljević *JP EPS*, Beograd
Nenad Marković *Goša*, Smederevska Palanka
Vesna Peruničić *Termoelektro*, Beograd
Dragoljub Radojčić *Kontrol inspekt*, Beograd
Goran Sofronić *Zavod za zavarivanje*, Beograd

ORGANIZATORI

„PROCESING 2010“

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS),
Sekcija za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd
Tel. +381 (0) 11 3230-041, +381 (0) 11 3031-696,
tel./faks +381 (0) 11 3231-372
E-mail: office@smeits.rs,
web: www.smeits.rs

Savetovanje „ZAVARIVANJE 2010“

Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji (DUZS),
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd
Tel./faks +381 (0) 11 2850-794
E-mail: duzs@eunet.rs,
web: www.duzs.org.rs

Savetovanje „IBR 2010“

Srpsko društvo za ispitivanje
bez razaranja (SDIBR),
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd
Tel. +381 (0) 11 2851-079,
faks +381 (0) 11 2850-648
E-mail: zzzgo1@eunet.rs,
web: www.sdibr.org.rs

VI. Osnovne operacije, aparati i mašine u procesnoj industriji

37. BRZINA TEČNOSTI PRI INVERZNOJ FLUIDIZACIJI U BARBOTAŽNOJ KOLONI SA KONCENTRIČNOM CEVI
Dragica Z. Jovičević, Ivana M. Šijački,
Milenko S. Tokić i Predrag S. Kojić
38. KORELISANJE PRELAZA TOPLOTE PRI KONTAKTNOJ KONDENZACIJI NA SEGMENTNIM PODOVIMA
Branislav M. Jaćimović, Srbislav B. Genić i Ljubiša A. Vladić
39. FORMIRANJE VRTLOGA UNUTAR DUBOKIH CAVITY (ŠUPLJINA) PRIMENOM LATTICE BOLTZMANN METODE
Nataša Lj. Lukić, Jelena Đ. Marković,
Predrag M. Tekić i Jelena B. Rađenović
40. ANALIZA STRUJANJA FLUIDA I FORMIRANJA VRTLOGA IZMEĐU DVE NERAVNE PLOČE PRIMENOM NUMERIČKIH METODA
Jelena Đ. Marković, Nataša Lj. Lukić,
Predrag M. Tekić i Jelena B. Rađenović
41. UTICAJ DODATKA ALKOHOLA I TIPA DISTRIBUTORA NA HIDRODINAMIKU BARBOTAŽNE KOLONE SA KONCENTRIČNOM CEVI
Milenko S. Tokić, Predrag S. Kojić,
Ivana M. Šijački i Dragica Z. Jovičević
42. ANALIZA SLIČNOSTI PROCESA IZMENA TOPLOTE I MASE U MAGLENOJ KOMORI KLIMATIZACIONOG UREĐAJA
Šefik M. Bajamak
43. TESTIRANJE GASNO NEPROPUSNOG OBJEKTA PRIMENOM DIFUZIONOG - EFUZIONOG MATEMATIČKOG MODELA ZA ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROPUŠTANJA D_u
Slobodan Rackov i Slobodan Ristić

RADOVI NA ZAVARIVANJU 2010

I. Konvencionalni i nekonvencionalni postupci zavarivanja

44. ZAVARIVANJA I REZANJE METALA PODVODNOM TEHNOLOGIJOM
S. Ju. Maksimov, V. S. But, O. I. Oleinik i D. Bajić
45. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POPUNJAVAJUĆOM ELEKTRODOM
G. V. Kuzmenko i D. Bajić
46. TEHNOLOGIJA ORBITALNOG ZAVARIVANJA CJEVOVODA PRIMJENOM AKTIVIRAJUĆEG TOPITELJA
S. Ju. Savitsky, D. Bajić, M. M. Savitsky,
V. N. Vashchenko, A. F. Lupan i Ju. M. Skrabaliuk

47. UTICAJ PARAMETARA FSW POSTUPKA ZAVARIVANJA NA KVALITET ZAVAREN OG SPOJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 5052
Miroslav Mijajlović, Aleksandar Živković, Dragan Milčić i Igor Radisavljević
48. KOMPARACIJA METODA KONAČNIH ELEMENATA I METODA KONAČNIH VOLUMENA NA PROBLEMU JEDNODIMENZIONOG NESTACIONARNOG PRENOSA TOPLOTE
E. Džih, S. Isić i S. Pašić

II. Osnovni, dodatni i pomoćni materijali

49. ANALIZA KVALITETA ZAVAREN OG SPOJA ČELIKA X10CrNiMoTi18.10 DOBIJEN OG ZAVARIVANJEM ELEKTRODOM PIVA 18/8/6B
Ž. Blečić, A. Vukosavljević, D. Blečić, V. Grabulov i I. Nikolić
50. ZAVARIVANJE I NAVARIVANJE POD PRAŠKOM - NOVOSTI
Jožica Cankar, Marjan Bregant i Mojca Šolar
51. KISELA ILI RUTILNA OBLOGA NA ELEKRODI ZA REL POSTUPAK VARENJA?
Z. Karastojković, Z. Kovačević, Z. Janjušević i N. Bajić
52. OPTIMIZACIJA REŽIMA ZAVARIVANJA KORIŠĆENJEM TOPITELJA
D. Bajić, M. M. Savitsky i Ž. Blečić
53. STRUKTURA METALA ŠAVA I ZUTA DOBIJENA SA PUNJENOM ŽICOM MAG POSTUPKOM
Nikola Bajić, Vera Šijački-Žeravčić, Marko Rakin i Slobodan Stojadinović
54. TEORIJSKO-EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE BRZINE HLAĐENJA PRI NAVARIVANJU KOVAČKIH ALATA I UTICAJ TE BRZINE NA KORISNE OSOBINE NAVARIVANIH ALATA
Vukić Lazić, Milorad Jovanović, Ružica Nikolić, Srbislav Aleksandrović, Božidar Krstić i Milan Mutavdžić
55. OCENA ZAVARLJIVOSTI I IZBOR NAJPOVOLJNIJEG POSTUPKA I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ČELIKA POVIŠENE JAČINE WELDOX 700
Milorad Jovanović, Vukić Lazić, Petar Marinković, Branislav Nedeljković, Srbislav Aleksandrović i Dragan Milosavljević

III. Integritet konstrukcija i osiguranje kvaliteta

56. TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE I MIKROSTRUKTURNA SVOJSTVA NAVARENIH SLOJEVA SA NAJMANJOM I NAJVEĆOM OTPORNOŠĆU NA HABANJE
M. Perović, D. Veljić i A. Živković

OCENA ZAVARLJIVOSTI I IZBOR NAJPOVOLJNIJEG POSTUPKA I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ČELIKA POVIŠENE JAČINE WELDOX 700

ESTIMATES OF WELDABILITY AND SELECTION OF THE OPTIMAL PROCEDURE AND TECHNOLOGY FOR WELDING OF HIGH STRENGTH STEEL WELDOX 700

MILORAD JOVANOVIĆ I VUKIĆ LAZIĆ,
MAŠINSKI FAKULTET, KRAGUJEVAC,
PETAR MARINKOVIĆ I BRANISLAV NEDELJKOVIĆ,
ZASTAVA AUTOMOBILI, KRAGUJEVAC,
SRBISLAV ALEKSANDROVIĆ I DRAGAN MILOSAVLJEVIĆ,
MAŠINSKI FAKULTET, KRAGUJEVAC

Čelici povišene jačine spadaju u kvalitetne čelike, sa izuzetnim mehaničkim svojstvima, posebno u pogledu zatezne jačine. U isto vreme, kao njihova mana ističe se ograničena i otežana zavarljivost. Drugim rečima, neki od ovih čelika su zavarljivi samo uz primenu posebnih mera vezanih za kontrolisani unos toplote. Postojeće, vrlo štire i neretko nejasne i nedovoljne, preporuke za izbor optimalne tehnologije zavarivanja jedan su od uzroka velikog broja grešaka u zavarenim spojevima. Navedeni problemi i drugi razlozi, mogu se uspešno rešiti pravilnim izborom postupka, dodatnog materijala i tehnologije zavarivanja, overenih eksperimentima izvedenim u laboratorijskim i realnim uslovima. Te opite nije moguće uraditi u proizvodnim uslovima, ali će tehnolozi zahvaljujući delom i rezultatima ovog rada dobiti mogućnost da unapred, u kratkom vremenskom roku, bez izvođenja velikog broja praktičnih proba ili oslanjanja na lično iskustvo projektanta, predvide mehanička i metalurška svojstva spoja ove klase čelika povišene jačine.

Ključne reči: čelik povišene jačine; Weldom 700; tehnologija zavarivanja; parametri zavarivanja.

High strength steels belong into a group of high quality steels, with exceptional mechanical properties, especially regarding tensile strength. At the same time, the limited and difficult weldability is emphasized as their weak points. In other words, some of those steels are weldable only with the application of special measures related to the controlled heat input. The existing scarce and, often, unclear and insufficient recommendations for the selection of the optimal welding technology are one of the causes of a large number of flaws in welded joints. The above mentioned as well as other problems can be successfully solved by the proper selection of the procedure, filler metal and technology of welding, verified by experiments conducted in the laboratory or real operating conditions. Those experiments can not be performed in arbitrary conditions, but partially, owing to this paper, technologists will have a possibility to predict in advance, in a very short time period, the mechanical and metallurgical properties of joints of this class of high strength steels, without conducting a large number of practical tests or relying on personal experience of a designer.

Key words: high strength steel; Weldom 700; welding technology; welding parameters

1. UVOD

U ovom radu razmatra se problematika zavarivanja čelika povišene jačine, sa posebnim osvrtom na specijalne niskolegirane čelike klase Weldox. Ovi čelici proizvode se u Švedskoj od 1992. godine. Izrađuju se po strogo kontrolisanom hemijskom sastavu i tačno definisanim proizvodnim fazama. To je omogućilo da se ostvare izuzetne povoljne mehaničke osobine sa uskim granicama tolerancija. Razlikuju se dve vrste ovih čelika: konstrukcioni i za sudove pod pritiskom. Njihova struktura je međufazna (feritno-perlitna) tako da spadaju u grupu dobro zavarljivih čelika, ali samo za ploče relativno manjih debljina. Dobijaju se postupkom termomehaničke obrade čeličnih poluproizvoda na visokim temperaturama-valjanje i kontrolisano hlađenje. Primenuju se za izradu različitih odgovornih čeličnih konstrukcija kao što su: dizalice, noseće platforme, građevinske mašine, transportne cisterne, delovi i sklopovi u vojnoj industriji izloženi visokim cikličnim opterećenjima i tsl. [2, 4, 8, 9, 17, 18].

Kvalitet zavarenog spoja zavisi od osobina osnovnog i dodatnog materijala, geometrije žleba, parametara zavarivanja, veštine zavarivača i stanja zavarivačke opreme. Najveći problem koji se odnosi na zavarljivost ovih čelika, posebno kod delova veće debljine, odnosi se na mogućnost pojave hladnih (vodoničnih) prslina. Uglavnom se ti problemi mogu rešiti upotrebom međuslojnih (korenskih) mekih austenitnih elektroda, kontrolisanim unosom toplote i u posebnim slučajevima predgrevanjem, dogrevanjem i naknadnom termičkom obradom.

2. OSNOVNI MATERIJAL I NJEGOVA ZAVARLJIVOST

U ovom radu analizirana je zavarljivost čelika Weldox 700. Postoje tri modifikacije ovog čelika (Weldox 700D = S690Q, Weldox 700E = S690QL i Weldox 700F = S690QL1) koje se razlikuju samo u pogledu udarne žilavosti. Hemijski sastav, najvažnije mehaničke osobine i vrednosti udarne žilavosti na sobnim i sniženim temperaturama, date su u tablicama 1, 2 i 3 [2, 17, 18].

Tablica 1. Propisan hemijski sastav osnovnog materijala

Oznaka	Zahtev	Sadržaj hemijskih elemenata, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Ti	N	Nb
Weldox 700 (D, E ili F)	Propisan max	0.20	1.50	0.60	0.020	0.010	0.70	0.70	2.0	0.09	0.015	0.005	0.30	0.040	0.010	0.040

Tablica 2. Mehaničke osobine osnovnog materijala i mikrostruktura

Oznaka	Debljina, mm	R _m , MPa	R _p , MPa	A ₅ , %	Mikrostruktura
Weldox 700 (D, E ili F)	4.0-53.0	780-930	700	14	Međufazna struktura poboljšanja
	53.1-100	780-930	650	14	
	100.1-130	710-900	630	14	

Tablica 3. Žilavost na sobnim i sniženim temperaturama

Oznaka	Temperatura, °C	Žilavost, J
Weldox 700 (D, E ili F)	0	30-40
	-20	27-35
	-40	27-30
	-60	max 27

Zavarljivost se računski procenjuje prema ukupnom ekvivalentnom ugljeniku i sklonosti ka nastanku hladnih prslina. U zavisnosti od primenjene metode i debljine zavarivanih delova, variraju i vrednosti tih ekvivalenata (tab. 4).

Tablica 4. Vrednosti ukupnog ekvivalentnog ugljenika [2, 17, 18]

Oznaka	Debljina, mm	Hemijski ekvivalentni ugljenik	
		$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \%$	$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}, \%$
Weldox 700 (D, E ili F)	8	0.43-0.55	0.29-0.36
	20	0.43-0.55	0.29-0.36
	30	0.46-0.55	0.31-0.36
	60	0.57-0.55	0.35-0.36

S obzirom na to da se u ovom radu analiziraju zavareni spojevi debljine od 3-50 mm, radi sprečavanja nastanka hladnih prslina, neophodno je predgrevanje delova veće debljine (tab. 4).

2.1 Mere za sprečavanje nastanka hladnih prslina

Kao što je napred spomenuto, ovi čelici su sklони ka nastanku hladnih prslina. Pravilno predgrevanje i interpas¹ temperatura (prelazna temperatura) su samo neke od mera za sprečavanje vodoničnih (hladnih) prslina. Ovde se navode samo neke važne preporuke [1, 2, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16] kojih se treba pridržavati pri zavarivanju ove klase čelika:

- Sniziti sadržaj vodonika u spoju ($H < 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ metala šava);
- Odabrati odgovarajuću temperaturu predgrevanja (T_p) i interpas temperaturu (T_{interpas});
- Priminiti niskovodonične elektrode (obavezno čuvanje i sušenje elektroda prema preporukama proizvođača);
- Odstraniti sve nečistoće iz zone zavarivanja (vlagu iz elektrode ili žice, vlagu ili rđu iz žleba i okolnih površina, vlagu iz masti i emulzija sadržanih u žlebu), zavarivati pri maloj vlažnosti vazduha i zaštitnog gasa;
- Preduzeti sve mere za smanjenje zaostalih napona u zavarenom spoju;
- Ne koristiti dodatne materijale veće jačine od potrebne i propisane;

¹ Interpas je prelazna temperatura do koje se hladi jednoprolazan zavar, tj. pri kojoj se počinje sa polaganjem drugog zavara.

- Odabrati najpovoljniji redosled zavarivanja koji umanjuje zaostale napone i deformacije;
- Usvojiti pravilan zazor u žlebu (max 3 mm i kod sučeonog i ugaonog žleba);
- Bez obzira da li je propisano predgrevanje, gasnim gorionikom pažljivo zagrejati neposrednu zonu spoja i njegovu okolinu, vodeći računa da se delovi ne zagreju iznad preporučene temperature predgrevanja/otpuštanja (od 150 do 200°C);
- Održavati maksimalnu interpas temperaturu u granicama $T_{interpas} \approx 200$ do 225°C, zavisno od krutosti/debljine zavarivanih delova;
- Ako je spoljašnja vlažnost povišena ili je temperatura ispod 5°C, najniža preporučena temperatura predgrevanja mora biti povećana za 25°C. Ovo doprinosi čvrstini pripojnih šavova koji se izvode sa unosom toplote oko 10 kJ/cm;
- Usvojene temperature predgrevanja i interpas temperature ne važe za slučaj da je unos toplote veći od 17 kJ/cm (zavarivanje relativno malom brzinom);
- Usvojena je pretpostavka da se zavareni spoj hladi na vazduhu sobne temperature (23±5°C);
- Zahtevane temperature predgrevanja i interpass-a mogu biti ostvarene na različite načine. Električni grejni elementu oko pripremljenog spoja često su najbolji izbor, jer oni omogućuju ravnomerno grejanje svih površina. Temperature moraju biti monitorovane pomoću kontaktnog (ili beskontaktnog) termometra;
- Vreme progrevanja iznosi 2 min/mm debljine (pa čak do 5 min/mm prema preporukama proizvođača čelika). Delovi se pritom sporo zagrevaju i sporo hlade;
- Ako je debljina ploče 25 mm temperatura se meri 2 min posle zagrevanja. Ako je ploča debela 12.5 mm, temperatura se meri posle 1 min. Interpas temperatura može biti izmerena na metalu šava ili na osnovnom materijalu u neposrednoj blizini šava;
- Pre zavarivanja u okolini zone spoja (ne i u samoj zoni spoja) naneti zaštitni sprej za lakše skidanje kapljica metala (koje znatno pršte na osnovni materijal, posebno pri MAG/MIG zavarivanju);
- Pripojne zavare izvesti prema tehnološkoj dokumentaciji (za prvi zavar), zavisno od vrste spoja i debljine ploča, a dužina pripoja treba da se kreće u granicama 40-50 mm. Preporučuje se da dodatni materijal pripoja bude isti kao i materijal korenskog zavara;
- Posle nanošenja svakog zavara detaljno očistiti (obiti) površinu gusenice od troske.

Preporučene temperature predgrevanja (za neke spojeve), za normalne uslove krutosti, naročito su bitne za pripojne šavove i korenski prolaz. Za strože uslove krutosti dalje se preporučuju viši nivoi temperature. Najviše radne temperature takođe se primenjuju za stroge uslove krutosti definisane kombinovanom debljinom ploča. Kod Weldox 700 se preporučuje temperatura predgrevanja od 150-200°C, a maksimalna interpas temperatura $T_{interpas} = 250^{\circ}\text{C}$ s ciljem da spreči poroznost u metalu šava izazvana turbulencijom vazduha.

Preporučene radne temperature treba da spreče hladne prsline koje se odnose na liniju topljenja osnovnog materijala. Međutim, vodonične prsline mogu se obrazovati i u metalu šava. Naročito kod dodatnog metala visoke jačine, čiji je napon tečenja oko 600 MPa.

Povišenje radne temperature najvažnije je pri zavarivanju pripoja i korenskog prolaza. Bez obzira na to, predgrevanje se često izbegava pri mnogim radovima. Naime, u toku zavarivanja prolaza ispune naponi se smanjuju zbog spontane termičke obrade nastale dejstvom toplote unete zavarima popune.

Povećane radne temperature treba izbegavati jer one otežavaju rad zavarivaču i pomoćnom osoblju. Potreba za povećanjem radne temperature može biti smanjena pomoću jedne od donjih mera ili njihovom kombinacijom, kao što su: naknadno zagrevanje, završna

obrada zavarenog spoja pre nastanka vodoničnih prslina (u roku od 48 h), povećan (visok) unos toplote i primena austenitnih dodatnih materijala.

3. IZBOR DODATNOG MATERIJALA, POSTUPKA I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA

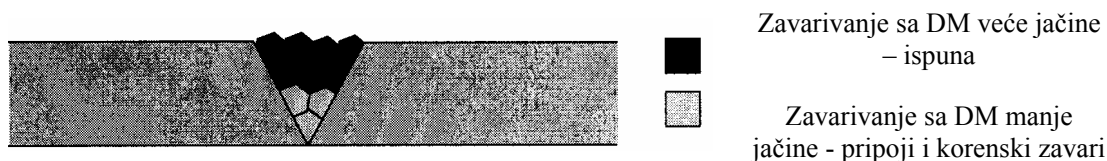
3.1 Dodatni materijal

Za zavarivanje materijala Weldom 700 trebalo bi primeniti bazične sušene elektrode ili uopšteno rečeno postupke zavarivanja koji garantuju da sadržaj vodonika u metalu šava bude $\leq 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ [1, 2, 4].

Niskolegirani i visokolegirani dodatni materijali mogu se upotrebiti za zavarivanje ovog čelika. Primenom dodatnih materijala manje jačine od osnovnog materijala postiže se veća žilavost zavarenog spoja, veća otpornost na vodonične prslina i niži zaostali naponi u zavarenom spoju, posebno u ZUT-u (lanac ne može biti jači od njegove najslabije karike).

Kod višeprolaznih spojeva od Weldom 700, naročito je korisno zavarivanje sa dodatnim materijalima različitih jačina (sl. 1). Pripojni šavovi i prvi prolaz zavaruju se sa dodatnim materijalom manje jačine, a zatim ostali prolazi se izvode sa dodatnim materijalom veće jačine. Ova se tehnika primenjuje kad se tehničkim uslovima traže približno ista svojstva otpornosti u svim delovima zavarenog spoja [1, 2, 17, 18].

Za izvođenje ugaonih šavova na čeliku Weldom 700 se preporučuju dodatni materijali nižeg napona tečenja u odnosu na osnovni materijal [1, 2].



Slika 1. Višeslojno zavarivanje različitim dodatnim materijalima

Sadržaj difundovanog vodonika kod bazičnih nelegiranih i visokolegiranih elektroda mora biti manji ili jednak 5 ml vodonika na 100 g metala šava. To se postiže precizno regulisanim sušenjem i upotrebom bazičnih austenitnih elektroda. Kod MAG i TIG zavarivanja dodatnim materijalom u obliku punih žica može se postići ovako nizak sadržaj vodonika u metalu šava. Sadržaj vodonika u metalu šava za druge tipove dodatnih materijala, kao što su npr. praškom punjene žice (MAG/MIG), iznosi onoliko koliko proizvođači dodatnog materijala garantuju [4].

Ako se dodatni materijal čuva u skladu sa preporukama proizvođača, sadržaj vodonika biće održan u označenim granicama. Ne preporučuje se zavarivanje u vertikalnom položaju odozgo nadole (PG). Najbolji način za sprečavanje vodoničnih prslina pri zavarivanju navedenog čelika jeste unošenje što manjih količina vodonika u zavaren spoj. U tom smislu, "higijena" zavarivanja je od izvanredne važnosti.

Bazične elektrode za REL zavarivanje se moraju čuvati, pripremiti i upotrebiti prema uputstvima i preporukama proizvođača dodatnog materijala [1, 2, 4, 17, 18, 19].

Dodatni materijali od nerđajućeg čelika

Dodatni materijali od nerđajućih čelika mogu biti upotrebljeni za zavarivanje svih konstrukcionih čelika. Oni omogućavaju zavarivanje pri sobnoj temperaturi bez predgrevanja. Preporučuju se prvenstveno dodatni materijali prema AWS 307, a zatim AWS 309 [1, 2]. Naime, dodatni materijali tipa AWS 307 mogu se odupreti vrućim prslinama bolje od AWS

309 [1, 2]. Treba primetiti da proizvođači retko specificiraju sadržaj vodonika za dodatne materijale od nerđajućeg čelika, pošto vodonik ne utiče na performanse u tolikoj meri, kao kod nelegiranih i niskolegiranih dodatnih materijala.

Za zavarivanje analiziranih odgovornih konstrukcija, za koje je trebalo propisati tehnologiju zavarivanja, pretežno je korišćen čelik povišene jačine Weldox 700, ali i opšti konstrukcioni čelik S355 J. Dodatni materijal i tehnologija zavarivanja prilagođavani su uvek lošije zavarljivom materijalu. Dakle, primenjivane su različite kombinacije dodatnih materijala, u zavisnosti od primenjenog postupaka zavarivanja (REL, MAG ili MIG). U ovom radu analizana je samo sledeća kombinacija dodatnih materijala: korenski zavari - elektroda INOX B 18/8/6 (REL) i zavari ispune – elektrodna žica MIG 75 (MAG u smeši gasova Ar + 18% CO₂). U tablici 5 date su najvažnije osobine razmatranih materijala.

Tablica 5. Hemijski sastav, mehaničke osobine i namena korišćenih dodatnih materijala [19-SŽ Fiprom]

Tip žice	Hemijski sastav, %						Mehaničke osobine čistog metala zavara			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	R _m , MPa	R _p , MPa	A ₅ , %	KV, J
INOX B 18/8/6*	0.12	0.8	7	19	9	-	590-690	> 350	> 40	> 80 (+20°C)
MIG 75**	0.6	0.6	1.7	0.25	1.5	0.5	770-940	> 690	> 17	> 47 (-40°C)
INOX B 18/8/6	Primenjuje se kao međuslojna za nanošenje korenskih zavara u cilju smanjivanja nivoa zaostalih napona, povećanja plastičnosti i žilavosti zavarenog spoja.									
INOX B 18/8/6	Za zavarivanje sitnozrnih čelika povišene jačine sa naponom tečenja do 690 MPa.									

*) INOX B 18/8/6 (SŽ Fiprom Jesenice, Slovenija) = E 18 8 Mn B 22 (EN 1600);

**) MIG 75 (SŽ Fiprom Jesenice, Slovenija) = Mn3Ni1CrMo (EN 12534);

3.2 Izbor postupka i parametara zavarivanja

Kao što je napred spomenuto, odgovorna zavarena konstrukcija sadrži uglavnom ugaone i sučeone spojeve različitih debljina. Korenski zavari su izvođeni postupkom ručnog-elektrolučnog zavarivanja, elektrodom INOX B 18/8/6 prečnika Ø3.25 mm i Ø2.5 mm. Zavari ispune, kao i pokrivni zavari izvođeni su zavarivanjem MAG postupkom u smeši gasova, elektrodom žicom prečnika Ø1.2 mm.

Shodno odgovarajućim računskim metodama i preporukama za izbor parametara zavarivanja, moguće je proračunati polazne parametre zavarivanja. Računska metoda za proračun ugaonih šavova data je prema proceduri izvođenja koju su autori ovog rada već testirali u više radova [5, 6, 7, 8, 9, 10] i praktičnih primera. Pored računskih parametara, treba uzeti u obzir još i neke iskustvene preporuke koje su detaljno navedene u tački 2.1.

Nije dovoljno osloniti se samo na proračunske parametre zavarivanja, već je potrebno da se oni uporede sa preporukama iz literature ili kataloga proizvođača zavarivačke opreme. Na osnovu toga mogu se korigovati proračunati parametri pre no što se pristupi realizaciji realnih spojeva na konstrukciji. To je omogućilo da se obave probna zavarivanja variranjem osnovnih parametara u preporučenim granicama. Osim vizuelne ocene zavarenih spojeva izvedena su i naknadna ispitivanja razaranjem tako ostvarenih spojeva. Tako se došlo do optimalnog režima zavarivanja. Na izvedenim probama ocenjivana je ostvarena geometrija, što je pored tvrdoće i mikrostrukture pojedinih zona osnovni kriterijum da procesna kontrola odobri ove proizvodne operacije.

U tablici 6 dati su: osnovni parametri zavarivanja, pogonska energija i očekivana karakteristična dubina uvarivanja. Usvojeni parametri zavarivanja treba da omogućće ostvarivanje potrebne dubine uvarivanja, zadate geometrije spoja i povoljne mikrostrukture i tvrdoće ZUT-a.

Tablica 6. Osnovni parametri zavarivanja pri izvođenju ugaonih višeprolaznih spojeva [1]

Vrsta zavara	Osnovni parametri zavarivanja					q_l	δ
	I, A	U, V	$v_z, cm/s$	$v_t, m/min$	$Q, l/min$	J/cm	mm
Korenski zavari (REL)	120	24.5	0.20	-	-	12000	1.8
Zavari ispune (MAG)	220-250	24-25	0.35-0.40	6-8	15-20	12822-13281	1.8-1.86

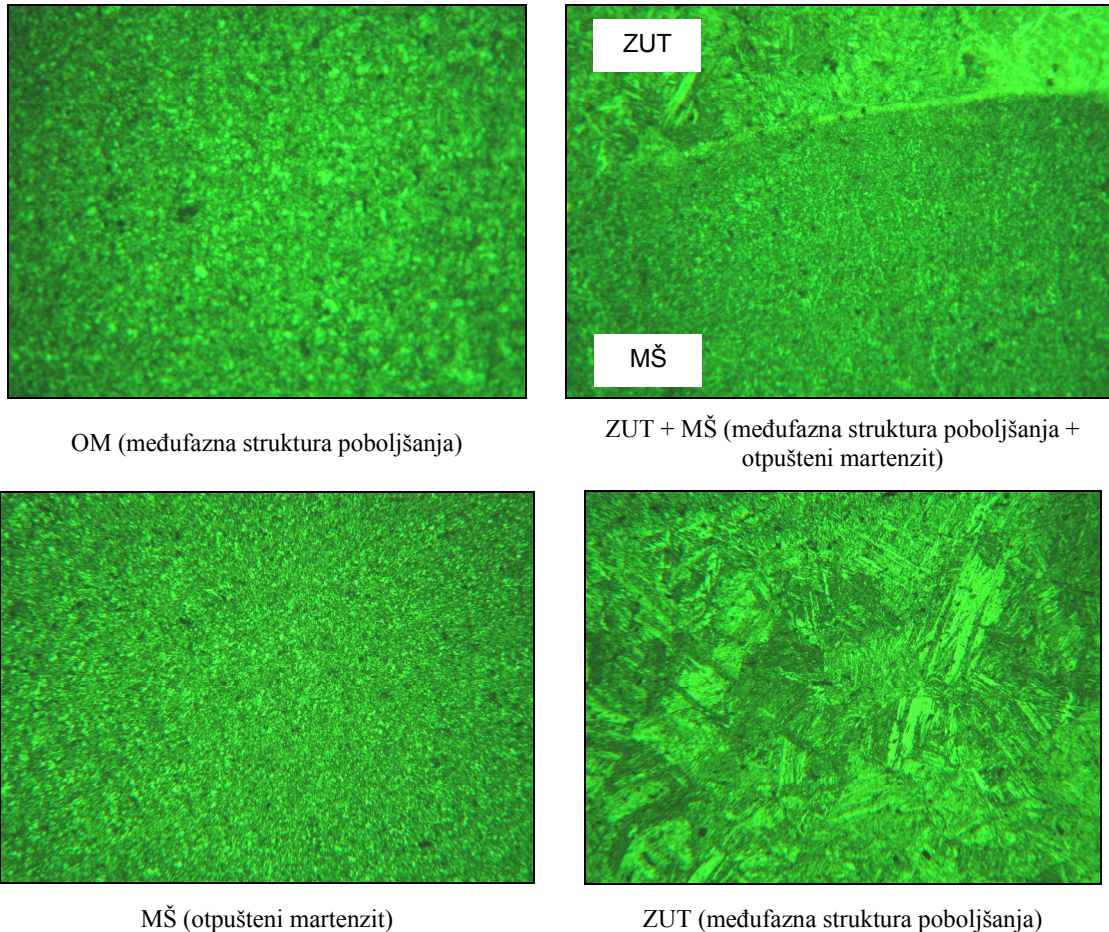
4. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA

Odabranom kombinacijom dodatnih materijala (tab. 5) i usvojenim parametrima zavarivanja (tab. 6) izvedeno je više desetina proba na karakterističnim ugaonim i sučeonim spojevima [1]. Na tim uzorcima izvršena su makrografska i mikrografska ispitivanja, a indirektno je proveravana i stručna osposobljenost zavarivača. Najpre je izvedeno merenje najvažnijih geometrijskih veličina (dubina uvarivanja, debljina šava, nadvišenje i tsl.), a zatim su izmerene tvrdoće pojedinih zona spoja i očitana mikrostruktura tih zona. Uzorci su pre zavarivanja birani na osnovu geometrijske sličnosti sa stvarnim spojem konstrukcije.

Na slici 2 prikazan je makroskopski izgled samo nekih pripremljenih uzoraka za metalografska ispitivanja, a na slici 3 prikazan je izgled karakterističnih mikrostrukture pojedinih zona zavarenog spoja.



Slika 2. Makroskopski izgled zavarenih spojeva



Slika 3. Mikrostrukture pojedinih zona zavarenog spoja (200x) [1]

Mikrostruktura osnovnog materijala (OM) ocenjena je kao međufazna struktura poboljšanja, tvrdoće 276-321 HV1. Mikrostruktura metala šava (MŠ) ocenjena je kao otpušteni martenzit, tvrdoće 339-426 HV1. Mikrostruktura zone uticaja toplote (ZUT-a) ocenjena je kao međufazna struktura poboljšanja, tvrdoće 276-290 HV1. Mikrostruktura metala šava korenskih prolaza ocenjena je kao austenitna, tvrdoće oko 224-245 HV1.

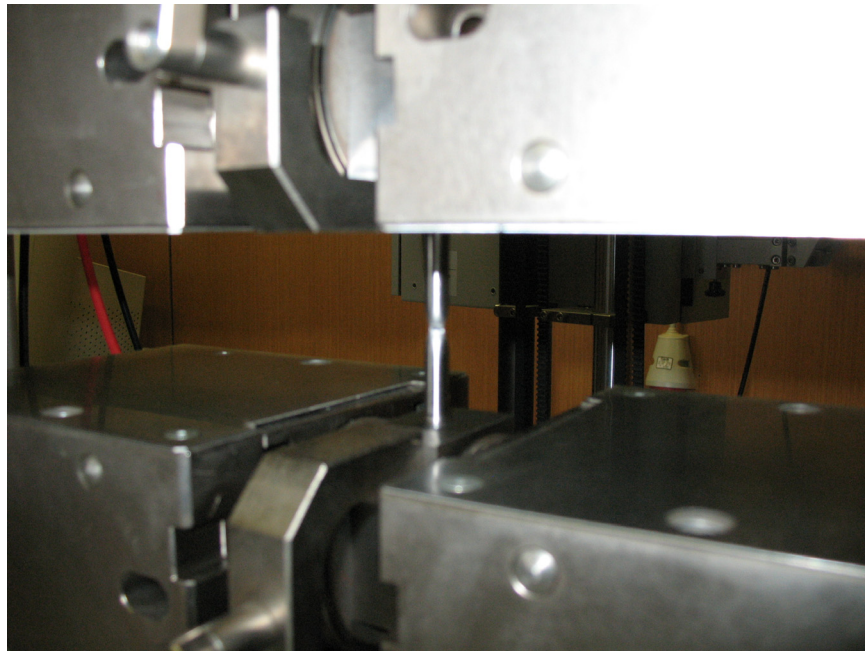
Analizom skoro svih metalografskih izbrusaka, ostvarenih napred propisanom kombinacijom dodatnih materijala i režimom zavarivanja, ustanovljen je gotovo isti tip mikrostrukture, a izmerene su i približno iste vrednosti tvrdoća pojedinih zona spoja. Dakle, vrednosti izmerenih tvrdoća i očitane mikrostrukture pojedinih zona spoja uglavnom zadovoljavaju zahteve standarda i odgovarajućih internih tehničkih uputstava.

5. MEHANIČKA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA

U cilju provere odnosno određivanja najvažnijih mehaničkih karakteristika osnovnog materijala i zavarenog spoja u celini, bilo je neophodno pripremiti epruvete prema odgovarajućim standardima. Epruvete su pripremane kako iz osnovnog materijala tako i zavarenog spoja (sl. 4). Izvedena su ispitivanja zatezanjem i ispitivanja udarne žilavosti.

5.1 Ispitivanje zatezanjem – prema JUS EN 10002-1

Pripremljene epruvete (iz osnovnog materijala i zavarenog spoja) su zatezane na kidalici ZWICK/ROELL Z 100 mernog opsega 1-100 kN (sl. 4). Brzina deformisanja iznosila je 10 mm/min . Ispitivanja su izvedena na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu i u akreditovanoj Laboratoriji Zastava automobili.



Slika 4. Ispitivanje zatezanjem na kidalici ZWICK/ROELL Z 100

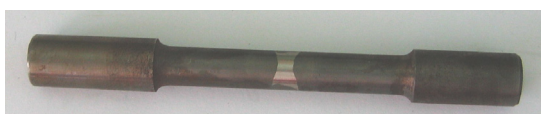
Izgled epruveta pre i posle ispitivanja prikazan je na slici 5. Karakteristični dijagrami zatezanja prikazani su na slikama 6 i 7, a obrađeni rezultati ispitivanja u tablici 7 (samo za osnovni materijal).



Epruveta za ispitivanje zatezanjem OM



Epruveta posle ispitivanja zatezanjem OM

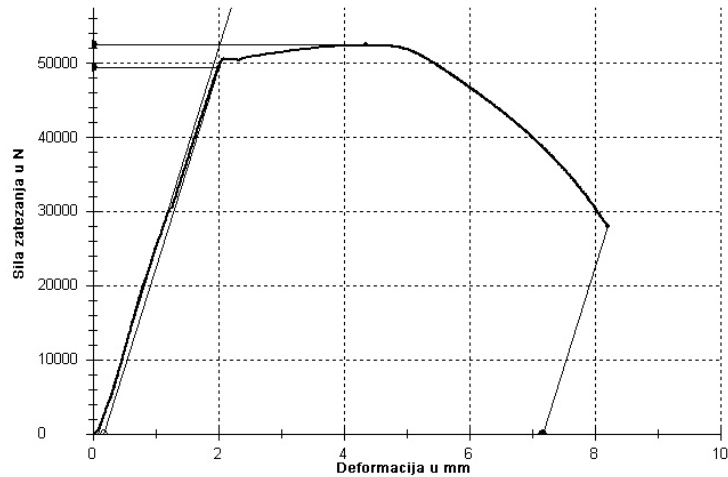


Epruveta za ispitivanje zatezanjem ZS

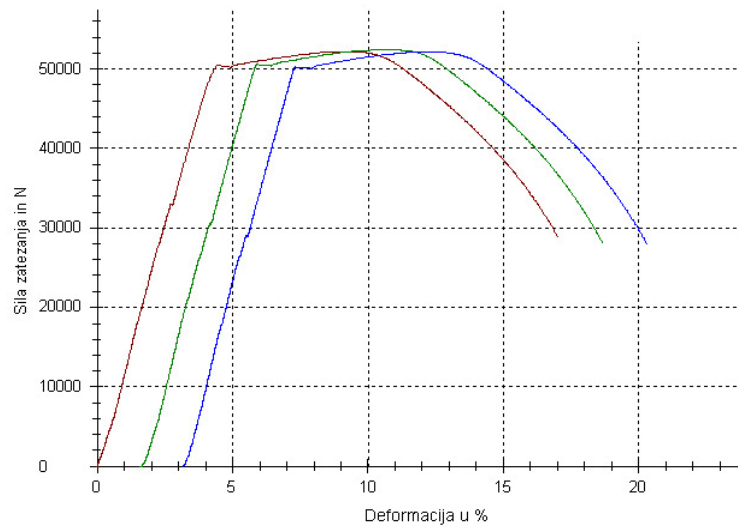


Epruveta posle ispitivanja zatezanjem ZS

Slika 5. Izgled epruveta za ispitivanje najvažnijih mehaničkih svojstava (pripremljenih i osnovnog materijala i zavarenog spoja)



Slika 6. Kriva zatezanja OM (epruveta br. 1)



Slika 7. Zbirni dijagram krivih zatezanja (3 epruvete)

Tablica 7. Zbirni rezultati ispitivanja zatezanjem (tri epruvete)

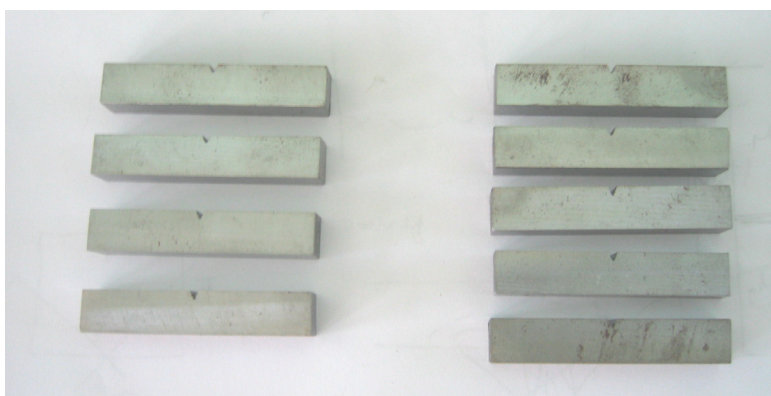
Br.	L_0	S_0	$R_{p0,2}$	R_m	A_5
	mm	mm ²	MPa	MPa	%
1	48.00	50.52	972.27	1032.29	14.65
2	48.00	50.52	977.10	1037.64	14.78
3	48.00	50.39	996.27	1033.99	14.92

Na sličan način ispitivane su i epruvete pripremljene iz sučeono zavarenog spoja. Dobijene vrednosti su se kretale u granicama: $R_m = 910-913 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 870-878 \text{ MPa}$ i $A_5 = 8.75-10.2 \%$. Iako dobijeni rezultati ukazuju na pravilno odabranu tehnologiju

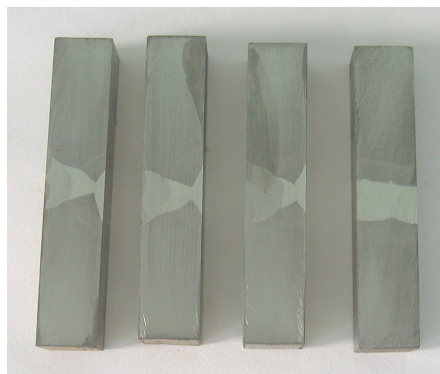
zavarivanja i dodatni materijal, ipak za pouzdaniji zaključak neophodna su dodatna ispitivanja na većem broju epruveta.

5.2 Ispitivanje udarom – metoda Šarpi

Po sličnoj proceduri, kao i za ispitivanje zatezanjem, pripremljene su epruvete - iz osnovnog materijala (sl. 8) i zavarenog spoja (sl. 9) koje su ispitivane na Šarpijevom klatnu u akreditovanoj Laboratoriji Zastava automobili. Rezultati ispitivanja žilavosti osnovnog materijala na sobnoj i sniženim temperaturama dati su u tablici 8.



Slika 8. Epruvete sa V-žlebom [1]



Slika 9. Priprema epruveta za ispitivanje udarom [1]

Tablica 8. Vrednosti žilavosti na sobnoj i sniženim temperaturama (OM)

Vrsta materijala	Temperatura, °C	Žilavost loma, KV, J
OM Weldox 700	+20	172; 166; 171; 158
	-40	157; 167; 155

Pri ispitivanju žilavosti zavarenog spoja dobijene su nešto niže vrednosti u odnosu na osnovni materijal, ali za pouzdaniji zaključak neophodna su dodatna ispitivanja na većem broju epruveta.

6. ZAKLJUČAK

Posle detaljne analize najvažnijih svojstava osnovnog materijala i procene njegove zavarljivosti, izbora najpovoljnije kombinacije dodatnih materijala, postupka i tehnologije zavarivanja, sprovedenih obimnih modelskih i ostalih ispitivanja, utvrđena je najpovoljnija tehnologija zavarivanja koja je "preneta" na realnu konstrukciju. Zavarena konstrukcija izvedena predloženom tehnologijom zavarivanja podvrgnuta je rigoroznom testu i pokazala se veoma pouzdanom.

Zbog svega navedenog, da bi se postigla dobra svojstva zavarenog spoja, bliska osobinama osnovnog materijala, neophodno je bilo pridržavati se preporuka proizvođača čelika, kao i saznanja drugih istraživača koji su se bavili ovom problematikom. Budući da u našoj literaturi ima relativno mali broj referenci iz ove oblasti, ovaj rad je pokušaj da se ustanovi neophodna procedura koja se mora poštovati u cilju izbora najpovoljnije tehnologije zavarivanja pri izradi veoma odgovornih zavarenih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] Jovanović, M., Lazić, V., Uputstvo za zavarivanje čelika povišene jačine, čelik: Weldom 700, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Beograd/Kragujevac, 2008.
- [2] Larsson, T. B., Berglund, T., Handbook on WELDING of Oxelösund steels, October 1992, Sweden.
- [3] Clarin, M., High Strength Steel -Local Buckling and Residual Stresses, Luleå University of Technology, Luleå, Novembar 2004.
- [4] Jovanović, M., Lazić, V., Praktikum REL i MAG/MIG zavarivanja, pomoćni univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2008.
- [5] Lazić, V., Adamović, D., Josifović, D., Jovanović, M.: Pобољшanje postupka zavarivanja sklopa zadnjeg mosta kamiona automatskim postupkom u zaštiti gasa, Međunarodno savetovanje-Zavarivanje '96, Beograd, 1996., str. 84-87.
- [6] Josifović, D., Jovanović, M., Lazić, V., The effect of welding conditions on the heat affected zone mechanical properties in low-alloy steel arc welding, 15th Conference on Materials Testing in Metallurgy and 11th Congress on Materials Testing, Volume 1, pp. 343/348, Euromat '94, Baltonszeplak, Hungary.
- [7] Josifović, D., Jovanović, M., Lazić, V., Optimizacija režima zavarivanja čelika povišene jačine, Prvi međunarodni naučno-stručni skup "Teška mašinogradnja", Kruševac-Vrnjačka Banja, Jugoslavija, Oktobar 1993., str. 340-345.
- [8] Jovanović, M., Lazić, V., Josifović, D., Adamović, D., Pregled visokovrednih konstrukcionih čelika i ocena njihove zavarljivosti, Zbornik MF, Kragujevac, 1995., str. 125-132.
- [9] Lazić, V., Adamović, D., Josifović, D., Jovanović, M., Prilog definisanju graničnih parametara zavarivanja konstrukcionih čelika povišene jačine, Zbornik MF, Kragujevac, 1995., str. 133-140.
- [10] Lazić, V., Sedmak, A., Živković, M., Aleksandrović, S., Čukić, R., Jovičić, R., Ivanović, I., Theoretical-experimental determining of cooling time ($t_{8/5}$) in hard facing of steels for forging dies, Thermal science, Vol. 14, No. 1, pp. 235-246, 2010.
- [11] European Standard prEN 1011: Guidelines for arc welding of ferritic structural steels.

- [12] Determination of suitable minimum preheating temperature for the cold-crack-free welding of steels. IIW-Doc. IX-1631-91.
- [13] Determination of the effect of welding on the toughnesses in the heat-affected zone of welded joints. IIW-Doc. IX-1340-84.
- [14] Determination of the effect of welding on the maximum hardness in the heat-affected zone of welded joints. IIW-Doc. IX-1342-84.
- [15] Müsgen, B., High strength quenched and tempered steels-production, properties and applications. Metal Construction (1985), pp. 495-500.
- [16] Müsgen, B. und Hoffmann K., Improvement of the fatigue strength of welded high strength steels. Thyssen Technische Berichte (1979), Heft 1, pp. 67-79.
- [17] <http://www.ssabox.com> (2009.)
- [18] <http://www.weldox.com> (2009.)
- [19] Katalozi proizvođača dodatnog materijala: SŽ Fiprom Jesenice Slovenija, Piva Plužine Crna Gora, Elavaco Bijeljina Republika Srpska – BiH i dr.