



**Dr Aleksandar Živković, **Vladimir Milanović, **Prof. dr Vukić Lazić*

INCREASED PRODUCTIVITY WELDING OF STEEL WELDOX 700 POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI ZAVARIVANJA ČELIKA WELDOX 700

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.313:669.14

Rad primljen / Paper received:

Mart 2015.

Adresa autora / Author's address:

**Dr Aleksandar Živković, GOŠA FOM a.d. Smed. Palanka*

***Vladimir Milanović, student FIN Kragujevac*

***Prof. dr Vukić Lazić FIN Kragujevac*

Ključne reči: finožrni čelik povišene čvrstoće, zavarivanje, obložena elektroda, punjena žica, koreni prolaz.

Key words: fine grained high strength steel, welding, covered electrode, flux-cored wire, root passes

Izvod: U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja dve različite tehnologije zavarivanja čelika povišene čvrstoće S690QL koji je sklon hladnim prslinama. Zavarivanje prve ploče vršeno je kombinacijom postupaka ručnog elektrolučnog zavarivanja (111) i elektrolučnog zavarivanja punom žicom u zaštiti CO₂ (135). Koreni prolaz urađen je postupkom zavarivanja 111, a prolazi popune postupkom 135. Druga tehnologija uključuje postupak elektrolučnim zavarivanjem punjenom žicom u zaštiti CO₂ (136) za koreni prolaz, a postupak 135 je korišćen za prolaze popune.

Eksperiment se zasniva na ispitivanju zavarenog spoja metodama bez i sa razaranjem u cilju pronalaženja adekvatnog postupka zavarivanja sa aspekta postizanja veće produktivnosti rada bez ugrožavanja njegove pouzdanosti.

Abstract: This paper presents the results of an experiment in which two different technologies of welding high strength steel S690QL, prone to cold cracking. Welding of the first panel includes a combination of the manual arc welding (111) and gas metal arc welding (135) process. 111 procedure welds the root passes while the 135 process fills in the passes. The second technology includes the flux-cored arc welding (136) welding process for both the roots and the 135 process fills in of the passes.

The experiment is realized by the examination of welds by non-destructive and destructive methods in order to find a proper welding procedure in terms of achieving greater labor productivity without compromising its reliability

1. UVOD

Čelici povišene čvrstoće imaju povišenu zateznu čvrstoću, napon tečenja, izduženje i žilavost, a ove osobine zadržavaju i pri niskim temperaturama uz odličan odnos težine i cene, pa su stoga izuzetno pogodni za izradu odgovornih čeličnih konstrukcija [1] [3]. Prihvaćeni su kao opšti konstrukcioni materijali za industrijsku primenu, tako da postoji sve veća težnja ka povećanju produktivnosti. Čelici povišene čvrstoće se uslovno smatraju dobro zavarljivim, mada se pri njihovom korišćenju javljaju problemi degradacije osobina ZUT-a [2].

U ovom radu prikazana je analiza zavarivanja čelika S690QL – komercijalne oznake WELDOX 700, na dve ispitne probe,

pri čemu su promenjeni postupci zavarivanja korenog prolaza (postupci 111 i 136), dok su prolazi popune isti za obe probe (postupak 135), sa ciljem dobijanja veće produktivnosti primenom poluautomatskog postupka zavarivanja korenog prolaza. Projektom se zahtevalo da koren zavarnog spoja kompenzuje udarna opterećenja tokom eksploatacije uz primenu austenitnog dodatnog materijala. Prilikom zavarivanja preduzete su sve neophodne mere za smanjenje nepoželjenih pojava, koje se javljaju pri zavarivanju ovih čelika, kao što su: povećanje tvrdoće, smanjenje žilavosti, povećanje prelazne temperature i pojava diskontinuiteta raznih oblika u ZUT-u.



2. EKSPERIMENTALNI DEO

Podaci o osnovnom materijalu

Prema EN 10025-6, hemijski sastav čelika S690QL je definisan za petnaest elemenata, tabela 1., pri čemu je ekvivalent ugljenika maksimalno CEV=0,65.

Zatezne karakteristike su ispitane na elektromehaničkoj kidalici, na sobnoj temperaturi. Izmerene vrednosti prikazane su u tabeli 2.

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,20	0,80	1,70	0,02	0,01	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15

Table 1. Chemical composition S690QL (max. %)

Tabela 1. Hemijski sastav S690QL (max. %)

Broj epruvete	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A _{11,3} , %
1.	781,94	797,81	14,19
2.	809,40	839,92	11,3
3.	800,41	835,52	9,98
4.	811,95	842,45	10,92

Table 2. The experimental results of tensile tests – BM (Weldox 700) [5]

Tabela 2. Eksperimentalni rezultati ispitivanja zatezanjem – OM (Weldox 700) [5]

Vrednosti tvrdoće uzorka izmerene su metodom Vikers (HV₁₀). Izmerena tvrdoća osnovnog materijala (WELDOX 700) kretala se od 258 HV₁₀

(ploča I, uzorak 2, linija II – II, tačka 16), do 292 HV₁₀ (ploča II, uzorak 2, linija I – I, tačka 18) tabela 15 [4].

Vrsta materijala	Temperatura, °C	Broj uzorka	Energija loma, J	
			Ploča 1 111/135	Ploča 2 136/135
WELDOX 700	+20	1.	235,17	242,02
		2.	222,44	226,19
		3.	234,68	250,89
	-40	1.	219,59	238,10
		2.	179,78	210,84
		3.	206,08	221,39

Table 3. The experimental results of consumed fracture energy at ambient and low temperature – BM (Weldox 700) [5]

Tabela 3. Eksperimentalni rezultati utrošene energije loma na sobnoj i sniženoj temperaturi OM (WELDOX 700) [5]

3. Podaci o dodatnom materijalu

Prva ispitna ploča je zavarena kombinacijom postupaka 111, primenom austenitne bazične elektrode - INOX B 18/8/6 (EN 1600: E 18 8 Mn B 22) prečnika Ø 3,25 za koreni prolaz i postupka 135, primenom pune žice MIG 75

(EN 12534 Mn3Ni1CrMo), prečnika Ø1,2 za prolaze popune u zaštiti mešavine Ar + 18% CO₂. Dodatni materijali su proizvođača „Jesenice“, Slovenija.



Kataloške vrednosti za korišćenu elektrodu:

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,12	0,8	7	19	9

Table 4. Chemical composition pure weld metal in %
Tabela 4. Hemijski sastav čistog metala šava u %

Rp0,2, MPa	Rm, MPa	A5, %	KV (+ 20°C), J
> 350	590-690	> 40	> 80

Table 5. Mechanical characteristics pure weld metal
Tabela 5. Mehaničke karakteristike čistog metala šava

Kataloške vrednosti za korišćenu punu žicu:

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,08	0,6	1,7	0,25	1,5	0,3

Table 6. Chemical composition pure weld metal in %
Tabela 6. Hemijski sastav čistog metala šava u %

Rp0,2, MPa	Rm, MPa	A5, %	KV (+ 20°C), J
> 690	770 – 940	> 17	> 47

Table 7. Mechanical characteristics pure weld metal
Tabela 7. Mehaničke karakteristike čistog metala šava

Druga ispitna ploča zavarena je kombinacijom postupaka 136, primenom punjene žice A 7 – FD (EN 17633 T 18 8 Mn R C 3), u zaštitnoj atmosferi

CO₂, prečnika Ø1,2 za koreni prolaz, proizvođač BÖHLER i postupka 135 za prolaze popune primenom pune žice MIG 75 Ø1,2 u zaštiti mešavine Ar + 18% CO₂.

Kataloške vrednosti za korišćenu punjenu žicu:

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,1	0,7	6,5	18,5	8,8

Table 8. Chemical composition pure weld metal in %
Tabela 8. Hemijski sastav čistog metala šava u %

Rp0,2, MPa	Rm, MPa	A5, %	KV (+ 20°C), J
420	630	39	60

Table 9. Mechanical characteristics pure weld metal
Tabela 9. Mehaničke karakteristike čistog metala šava



4. Postupak zavarivanja

Zavarivanje je izvršeno na dve ispitne ploče na osnovnom materijalu WELDOX 700, dimenzija: $\neq 15 \times 240 \times 390$ mm (dve probe). Prilikom zavarivanja vršeno je predgrevanje gasnim grejačima na temperaturu $T_p = 200^\circ\text{C}$, a temperatura međuprolaza održavana je u intervalu od $200 \div 225^\circ\text{C}$. Kontrola ovih temperatura vršena je bezkontaktnim termometrom. Nakon zavarivanja ploče su hladjene na vazduhu. Priprema žleba ($V-60^\circ$) ispitnih ploča izvršena je mašinskim putem na

glodalici. Pre početka zavarivanja ploče su postavljene pod uglom, radi smanjenja deformacija koje nastaju pri zavarivanju usled unete količine toplote. Parametri zavarivanja koji su korišćeni odabrani su tako da je uneta količina energije u preporučenim granicama, da ne bi došlo do prevelikog ukрупnjavanja zrna u ZUT-u. Zavarene ispitne ploče prvo su ispitane ultrazvukom. Tom prilikom je ustanovljeno da ne postoje nedozvoljene greške u zavarenim spojevima

5. Rezultati ispitivanja sa razaranjem

5.1 Ispitivanje zatezanjem

Ispitivanje zatezanjem je vršeno na standardno pripremljenim epruvetama (SRPS EN 895) za

sučeonni spoj i rezultati [5] su prikazani u tabelama 10 i 11.

Broj epruvete	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %	Mesto loma
1.	839,92	11,30	Osnovni materijal
2.	831,08	9,77	Osnovni materijal
3.	812,00	5,49	Osnovni materijal
4.	804,47	5,38	Osnovni materijal

Tabela 10. The experimental results of tensile tests – plate 1. (111 / 135)
Tabela 10. Eksperimentalni rezultati ispitivanja zatezanjem – ploča 1. (111 / 135)

Broj epruvete	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %	Mesto loma
1.	834,36	11,59	Osnovni materijal
2.	834,30	9,12	Osnovni materijal
3.	832,90	10,92	Osnovni materijal
4.	837,26	11,48	Osnovni materijal

Tabela 11. The experimental results of tensile tests – plate 2. (136 / 135)
Tabela 11. Eksperimentalni rezultati ispitivanja zatezanjem – ploča 2. (136/135)



5.2 Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje je vršeno na standardno pripremljenim epruvetama sa „V“ zarezom (SRPS EN 875) za

sučeoni spoj, pri čemu je određivana žilavost u metalu šava, na liniji stapanja i u zoni uticaja toplote [5], tabele 12–14.

Vrsta materijala	Temperatura, °C	Broj uzorka	Energija loma, J	
			Ploča 1 111 / 135	Ploča 2 136 / 135
WELDOX 700	+20	1.	44,54	25,27
		2.	52,05	30,23
		3.	47,31	24,84
		4.	49,21	26,29
		5.	35,95	35,30

Tabela 12. Consumed energy fracture face dolphins at +20°C

Tabela 12. Utrošene energije loma lica šava na +20°C

Vrsta materijala	Temperatura, °C	Broj uzorka	Energija loma, J	
			Ploča 1 111 / 135	Ploča 2 135 / 135
WELDOX 700	+20	1.	30,67	16,94
		2.	27,33	20,36
		3.	45,03	17,65
		4.	26,12	15,32

Tabela 13. Consumed energy fracture root dolphins at +20°C

Tabela 13. Utrošene energije loma korena šava na +20°C

Vrsta materijala	Temperatura, °C	Broj uzorka	Energija loma, J	
			Ploča 1 111 / 135	Ploča 2 136 / 135
WELDOX 700	+20	1.	50,53	18,44
		2.	28,29	25,95
		3.	34,84	18,52
		4.	34,66	24,50
		5.	34,93	29,78

Tabela 14. Consumed energy fracture root – fusion line at +20°C

Tabela 14. Utrošene energije loma koren – linija stapanja na +20°C

5.3 Metalografska ispitivanja

Makrostrukturno ispitivanje vršeno na standardno pripremljenim epruvetama za sučeoni spoj [4].

Ispitivanje mikrostrukture je vršeno u skladu sa SRPS EN 1321.

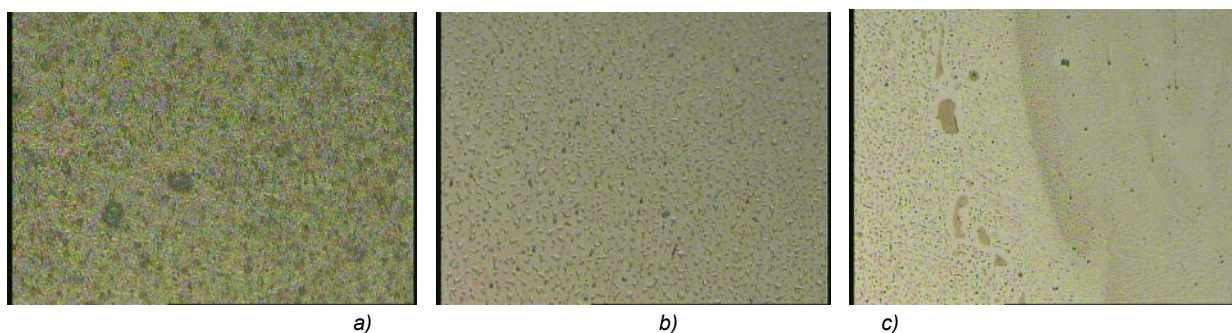


Figure 1. a) material face dolphins, b) material root dolphins plate - I and c) material root dolphins plate - II (exaggerated 200x)
Slika 1. a) materijal lica šava, b) materijal korena šava ploča – I i c) materijal korena šava ploča - II (uvećano 200x)



5.4 Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće vršeno je prema ISO 6507-1 na sva četiri uzorka sa po tri linije (pravca) i po

dvadesetak mernih tačaka. Dobijene su uglavnom ujednačene vrednosti [4], što je prikazano u tabeli 15.

Broj merne tačke	Broj uzorka / Broj ploče											
	PLOČA I (111/135)						PLOČA II (136/135)					
	Uzorak 1			Uzorak 2			Uzorak 1			Uzorak 2		
	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III
1	260	279	276	281	279	279	287	279	279	279	279	279
2	260	279	276	274	276	279	279	279	279	279	281	279
3	260	279	276	279	279	279	279	279	279	279	281	276
4	245	281	270	254	276	279	274	279	276	276	279	276
5	333	276	270	251	276	279	336	279	279	279	279	276
6	333	276	270	342	276	279	376	279	279	376	279	274
7	281	251	336	289	254	266	302	270	283	363	253	383
8	281	314	348	287	256	262	292	319	380	370	327	376
9	281	327	191	281	339	336	354	387	274	370	376	171
10	314	210	193	276	317	336	363	215	182	387	281	179
11	299	327	166	390	319	198	317	180	182	405	185	173
12	270	348	186	299	191	183	319	366	180	405	228	194
13	272	243	376	268	333	186	330	354	376	401	236	387
14	333	262	279	266	325	197	336	274	302	380	287	268
15	339	276	276	294	236	336	351	281	285	376	276	289
16	242	276	276	325	258	342	360	274	283	380	279	283
17	279	276	276	351	281	245	264	281	276	287	279	289
18	279	276	274	276	276	281	279	281	276	292	279	283
19	279	276	276	279	276	279	279	287	279	276	279	283
20	-	-	-	279	270	279	279	279	279	279	279	281

■ osnovni materijal, ■ ZUT, ■ metal šava

Table 15. Hardness value of the sample measured by the method Vikers (HV₁₀)

Tabela 15. Vrednosti tvrdoće uzorka izmerene metodom Vikers (HV₁₀)

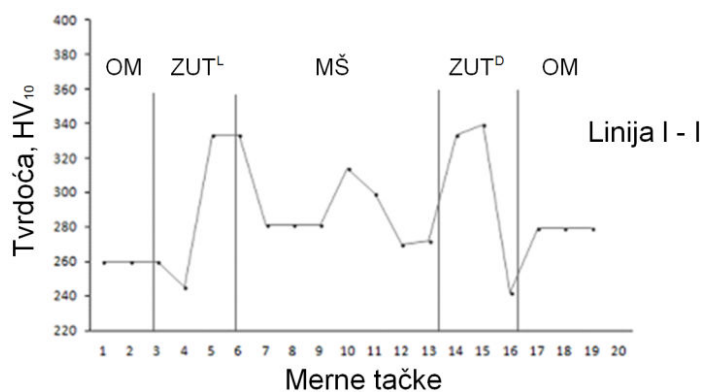


Figure 2. Diagram of distribution of hardness – plate 1, pattern – 1

Slika 2. Dijagrami raspodele tvrdoće: ploča – 1, uzorak – 1

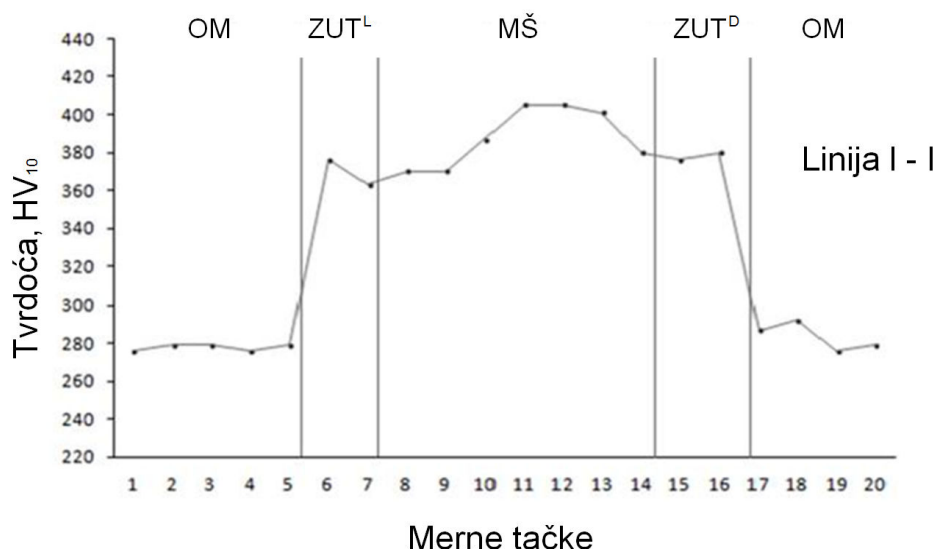


Figure 3. Diagram of distribution of hardness – plate 2, pattern – 2
Slika 3. Dijagram raspodele tvrdoće: ploča – 2, uzorak – 2

6. DISKUSIJA

Prilikom ispitivanja najvažnijih mehaničkih karakteristika kao i mikrostrukturnog ispitivanja osnovnog materijala ispitnih ploča, dobijene su vrednosti slične tabelarnim vrednostima datim u katalozima proizvođača.

Zatezne karakteristike epruveta za ispitivanje zatezanjem zavarenog spoja su veoma bliske ili veće od vrednosti osnovnog materijala. Svi lomovi epruveta su se dogodili u osnovnom materijalu.

S obzirom da je za zavarivanje korenog prolaza korišćen austenitni dodatni materijal, ispitivanje žilavosti vršeno je na +20°C. Vrednosti ispitivanja žilavosti dobijeni pri ispitivanju prve probe, su znatno niže od vrednosti žilavosti za osnovni materijal, ali su ipak iznad standardom propisanih vrednosti. Vrednosti žilavosti druge probe (postupak 136 / 135) ukazuju na pad vrednosti žilavosti u zavarenom spoju u odnosu na osnovni materijal. Ovo je nepovoljan slučaj sa stanovišta homogenosti i sigurnosti zavarenog spoja u celini. Javila su se mesta sa niskim vrednostima energije loma. Ukoliko se uporede vrednosti energije loma na licu metala šava, u korenu šava i na liniji stapanja u korenu za ove dve tehnologije, jasno se uočava da su pri zavarivanju postupkom 111/135, dobijene znatno veće vrednosti nego kod zavarivanja postupkom 136/135.

Analiza tvrdoće kroz presek zavarenog spoja pokazuje da su sve izmerene vrednosti tvrdoće ispod maksimalno dozvoljene vrednosti za čelik

S690QL prema EN 15614-1 (450 HV₁₀). Najviše izmerene vrednosti tvrdoće zabeležene su na linijama I – I kod obe ploče (slike 2 i 3) a maksimalna vrednost tvrdoće (370 ÷ 405 HV₁₀) je zabeležena na liniji I – I drugog uzorka, druge ploče. Najniže vrednosti tvrdoće (180 ÷ 387 HV₁₀) dobijene su u korenim prolazima metala šava primenom obe tehnologije. Ovako izmerene vrednosti na ovom mestu direktno su povezane sa izborom dodatnog materijala, čime je ispunjen zahtev konstrukcije. Dobijene vrednosti tvrdoće ukazuju na pravilan odabir parametara zavarivanja čime je postignuto optimalno vreme hlađenja u temperaturnom intervalu 800÷500°C, $\Delta t_{8/5} = 5\div 20s$. Kod makrostrukturnog ispitivanja, primenom obe tehnologije zavarivanja, nisu otkrivene greške na sva četiri ispitana uzorka, odnosno uzorci su u potpunosti u skladu sa standardom SRPS EN 5817 nivo B.

Mikrostrukturnim ispitivanjem je ustanovljeno da osnovni materijal ima martenzitno beinitnu strukturu, dok je za lice metala šava ustanovljena feritno-martenzitna struktura sa karbidima (slika 1.a), a koren metala šava ima austenitno-feritnu strukturu sa finim karbidima (slika 1.b i c) [4]. Ove strukture su se javile kod obe ispitne ploče na oba uzorka, sa neznatnim razlikama u broju i veličini karbidnih uključaka. Mikrostrukturnim ispitivanjem pokazano je da se primenjenim tehnologijama zavarivanja nije narušila struktura čelika povišene čvrstoće.



7. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih ispitivanja zavarenih spojeva na čeliku WELDOX 700 primenom navedenih tehnologija i prikazanih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Primenom obe tehnologije zavarivanja vrednosti ispitivanja zatezanjem su slične vrednostima osnovnog materijala;

- Analizom vrednosti tvrdoće, nisu uočene vrednosti tvrdoće izvan standardom zahtevanih veličina. Najveće vrednosti tvrdoće izmerene su na liniji I-I (tačke od 6 do 16) uzorak dva, ploča dva. Kod obe zavarene ploče poslednji prolaz, sa strane lica i korena, nije zavaren po sredini šava pa je izostala naknadna termička obrada prethodnih prolaza. Kada bi se dodatno primenila tehnologija koja obuhvata završni tehnološki prolaz po sredini šava, izvršilo bi se otpuštanje prethodnih prolaza i dobili bi se još povoljniji rezultati. Primenom austenitnog dodatnog materijala za zavarivanje korenog prolaza u navedenim tehnologijama povećava se plastičnost spoja, smanjuju zaostali naponi i apsorbuju eventualne mikroprslin u zavarenom spoju. Metal šava je dobio čvrstoću na osnovu zavara popune.

- Na osnovu ispitivanja zatezanjem, makrostrukturnog i mikrostrukturnog ispitivanja kao i ispitivanjem tvrdoće, nije bilo moguće da se odredi koja je od ove dve tehnologije povoljnija.

- Presudan uticaj na izbor upoređivanih tehnologija zavarivanja, sa aspekta povećanja produktivnosti, dali su rezultati ispitivanja žilavosti. Povoljniju žilavost ima spoj izveden kombinacijom postupaka 111/135.

- Bez obzira što sa aspekta produktivnosti druga tehnologija ima prednost, vrednosti žilavosti kod postupka 136/135 ne zadovoljavaju pouzdanost spoja.

- Veća sigurnost spoja mogla bi da se postigne tehnologijom zavarivanja koja bi podrazumevala završni tehnološki prolaz po sredini lica i korena šava čime bi se izvršilo otpuštanje prethodnih prolaza.

- Dalja ispitivanja sa aspekta produktivnosti zavarivanja čelika S690QL, a u cilju povećanja vrednosti udarne žilavosti, trebalo bi usmeriti na zavarivanje korenog prolaza punjenom žicom uz zaštitu različitih mešavina gasova.

Iako je stalno prisutan zahtev za povećanjem produktivnosti, tehnologija zavarivanja mora da se izabere na osnovu kvalifikacije tehnologije zavarivanja, a vrednosti ispitivanja morale bi da imaju približne vrednosti osnovnog materijala. Osnovni zahtev pri konstruisanju je pouzdanost, pa produktivnost ne sme da ima prednost pri izboru optimalne tehnologije zavarivanja.

REFERENCE

- [1] **Jovanović, M., Lazić V.:** Uputstvo za zavarivanje čelika povišene jačine Čelik: WELDOX 700 (S690 QL), Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet Inženjerskih Nauka, Kragujevac, April 2012.
- [2] **Radović, A.:** Metalurški i tehnološki problemi zavarljivosti, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [3] **Živković, A.:** "WELDOX" i "HARDOX" čelici, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (1/2004), str. 23-28.
- [4] Izveštaji mehaničko-metalografske laboratorije Instituta Goša, Smed. Palanka.
- [5] Izveštaji laboratorije za eksperimentalnu čvrstoću Vojnotehničkog instituta, Beograd.