

OCENA ZAVARLJIVOSTI I IZBOR NAJPOVOLJNIJE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ELIKA POVIŠENE JA INE HARDOX 450

ESTIMATES OF WELDABILITY AND SELECTION OF THE OPTIMAL TECHNOLOGY FOR WELDING OF HIGH STRENGTH STEEL HARDOX 450

V. Lazi¹, M. Jovanovi¹, D. or evi², S. Aleksandrovi¹,
P. Marinkovi³, B. Krsti¹, R. uki¹

Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, Sestre Janji 6, 34000 Kragujevac

²Milanovi inženjering d.o.o., Sobovica, bb Cerovac, 34321 Kragujevac

³Zastava automobili, Trg topoplivaca 4, 34000 Kragujevac

Apstrakt: U ovom radu razmatra se problematika zavarivanja elika povišene ja ine, sa posebnim osvrtom na specijalne niskolegirane elike otporne na habanje. U okviru razmatrane klase niskolegiranih poboljšanih elika povišene ja ine i tvrdo e posebno je analiziran elik Hardox 450. U teorijskom delu rada utvr ena je metodologija za ocenu zavarljivosti ovog elika, kao i prora un parametara zavarivanja. U eksperimentalnom delu rada detaljno je ispitivana tvrdo a i ocenjivana makro i mikrostruktura pojedinih zona zavarenog spoja. Tako e, izvedeno je i merenje deformacija na odgovaraju im uzorcima-modelima za zavarivanje. Dobijeni eksperimentalni rezultati mogu korisno poslužiti za utvr ivanje i izbor najpovoljnije tehnologije zavarivanja. Na ovaj na in utvr ena tehnologija i režim MAG zavarivanja omogu uju uspešno izvo enje zavarenih spojeva i svo enje mogu nosti nastanka grešaka i prsline na najmanju meru

Ključne reči: elik povišene ja ine, Hardox 450, tehnologija zavarivanja, parametri zavarivanja, tvrdo a, mikrostruktura.

Abstract: In this paper are considered problems of high strength steel welding, with special emphasis on special low alloyed wear resistant steels. Within the considered class of steels, low alloyed tempered steels, with high strength and hardness, specially treated is steel Hardox 450. In the theoretical part of the paper, the methodology for estimate of weldability of this steel was established and the computation of the welding parameters was performed. In the experimental part of the paper the hardness was investigated in details and the micro and macro structures of individual welded joints zones were evaluated. The measurements were also performed of deformations on the appropriate samples-models for welding. Obtained experimental results can usefully serve for establishing and selecting the optimal welding technology. In this way the established technology and regime of the MAG welding procedure enable successful realization of welded joints and reducing the possibility of flaws appearance ad cracks to the minimal extent.

Key word: high strength steel, Hardox 450, welding technology, welding parameters, hardness, microstructure.

1. UVOD

U ovom radu razmatra se problematika zavarivanja elika povišene ja ine, sa posebnim osvrtom na specijalne niskolegirane elike klase Hardox. Ovi elici proizvode se u Švedskoj od 1992. godine. Izra uju se po strogo kontrolisanom hemijskom sastavu i ta no definisanim proizvodnim fazama. To je omogu ilo da se ostvare izuzetne povoljne mehani ke osobine sa uskim granicama tolerancija.

elika Hardox 450 ima visoka svojstva jačine i posebno tvrdoće, zahvaljujući i specijalnim postupcima termičke obrade (kaljenje i sekvencijalno otpuštanje). Ne sme se pre zavarivanja predgrevati na temperaturama višim od 250°C niti se preporučuje naknadna termička obrada posle zavarivanja. Namenjen je za izradu delova izloženih habanju i posebno površina izloženih jakoj abraziji, kao što su: tovarni sanduci kamiona, visokopritisni sudovi, železni ki vagoni, cisterne za prevoz gasa, elementi drumskih vozila, različite zavarene konstrukcije itd. Kvalitet zavarenog spoja zavisi od osobina osnovnog materijala (OM) i dodatnog materijala (DM), geometrije žleba, veštine zavarivača i stanja zavarivačke opreme. Najveći problem koji se odnosi na zavarljivost klase ovih elika, posebno kod radnih predmeta veće debljine, odnosi se na mogućnost pojave hladnih (vodoničnih) prslina. Uglavnom se ti problemi mogu rešiti pravilnim izborom dodatnog materijala (austenitnih ili elektrodačiji napon tečenja ne nadmašuje 500 MPa), kontrolisanim unosom toplote i samo u posebnim slučajevima predgrevanjem ili naknadnom termičkom obradom. Pri tome se podrazumeva da se upotrebljavaju dodatni materijali koji daju nizak sadržaj vodonika. Zbog svega navedenog, da bi se postigla dobra svojstva zavarenog spoja, neophodno je pridržavati se preporuka datih u specijalizovanoj literaturi i odgovarajućim radovima i uputstvima [1-10].

2. OSNOVNI MATERIJAL I NJEGOVA ZAVARLJIVOST

2.1 Osobine osnovnog materijala

elici klase Hardox, isporučeni u obliku limova i ploča, namenjeni su za visoka opterećenja na habanje što im omogućava visoka tvrdoća, visoka čvrstoća i odlična žilavost. Primenuju se za opremu koja se koristi u eksploataciji ruda, i koja je izložena različitim vrstama naprezanja na habanje, klizanje i udarna opterećenja, često kombinovana sa velikim deformacijama. Primena elika ploča od Hardox-a sa tvrdoćom od 400 ili 500 HB može izdržati najteže uslove habanja. Hardox elik je pet puta postojaniji od ploča izrađenih od mekih niskougljeničnih elika, dok je Hardox 500 tri puta postojaniji od Hardox 400. vrstoća Hardox ploča je veoma velika, kao i visok stepen otpornosti na različitim temperaturama u najekstremnijim radnim uslovima. Ovaj Hardox elik naročito otpornim na udarna opterećenja. Železara Oxelösund daje sledeće podatke o hemijskom sastavu (tab. 1) i mehaničkim osobinama elika Hardox 450 (tab. 2) [2, 10].

Tabela 1. Propisan hemijski sastav elika Hardox 450 (s= 6 mm)

Oznaka	Zahtev	Sadržaj hemijskih elemenata, %										
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	B	CEV	CET
Hardox 450	Propisan max	0.21	160	0.70	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004	0.41	0.32

Tabela 2. Mehaničke osobine elika Hardox 450 (s= 6 mm)

Napon tečenja $R_{p0.2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje A_5 , %	Udarna žilavost KV, J
1200	1400	10	40 (-40°C)

Za rezanje Hardox ploha mogu se primeniti svi poznati postupci termičkog sečenja (tab. 3). elici ove klase veoma su osetljivi na unos toplote i zbog toga posebnu pažnju treba obratiti na uticaj primenjene metode sečenja i opasnost od pojave tvrdih i krutih faza.

Tabela 3. Primenjeni postupci rezanja i najvažniji parametri [2, 10]

Postupak rezanja	Debljina mm	Brzina rezanja mm/min	Širina reza mm	Tolerancija mm	Širina ZUT-a mm
Abrazivno vodenim mlazom	4÷150	8÷150	1÷3	± 0.2	0
Laserom	4÷20	600÷2200	<1	± 0.2	0.4÷3
Plazmom	4÷40	1200÷6000	2÷4	± 1.0	2÷5
Gasno	4÷150	150÷700	4÷10	± 2.0	4÷10

2.2 Zavarljivost elika Hardox 450

Hemijski ekvivalentni ugljenik (CEV) kod ovih elika izražava se pomoću sledećeg izraza:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}.$$

Uobičajene vrednosti ekvivalenta ugljenika elika Hardox 450 za debljine 4-80 mm kreću se u opsegu CE= 0.41-0.62.

Hardox 450 se može zavarivati svim elektrolitičkim postupcima zavarivanja topljenjem. Međutim, nije zagarantovana opšta podobnost zavarivanja ovih elika, već se zahtevaju odgovarajuće mere predostrožnosti, počev od izbora postupka zavarivanja, dodatnog materijala, do režima zavarivanja i strogo kontrolisanog unosa toplote tj. linijske energije zavarivanja. Dakle, pri izradi odgovornih zavarenih konstrukcija od Hardox elika potrebno je odabrati primarne osobine tj. odabrati materijal, tvrdoću i žilavost (posebno u ZUT-u) [1-10].

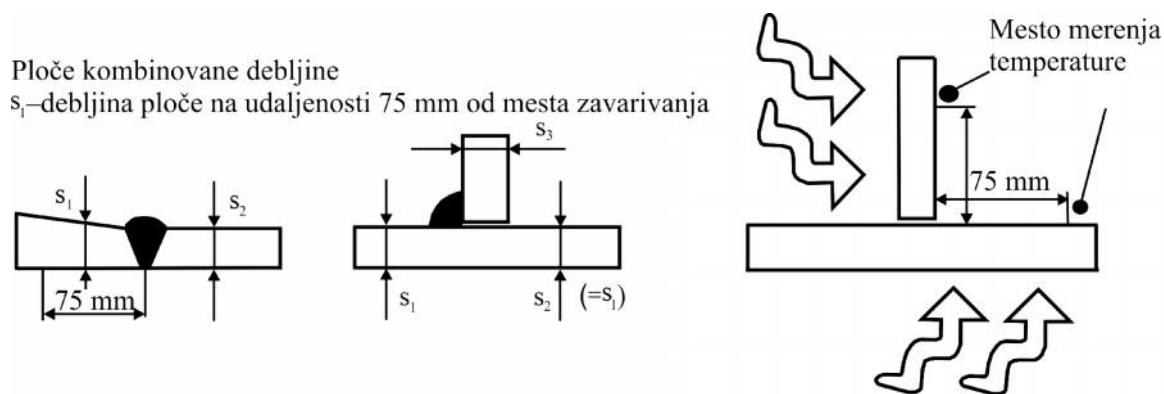
2.3 Mere za smanjenje rizika od hladnih prslina

Pojava vodonika, nastanak krutih struktura i prisustvo zatežućih napona u zavarenom spoju predstavljaju glavni razlog iniciranja hladnih prslina. Mogućnost nastanka hladnih prslina može se svesti na najmanju meru ako se sprovedu sledeće preporuke [1-10]:

- primeniti predgrevanje i održavati potrebnu temperaturu;
- smanjiti sadržaj difundovanog vodonika ($H < 5 \text{ ml/100 g}$ metala šava);
- koristiti suve i iste dodatne materijale;
- odstraniti sve nečistoće iz zone zavarivanja (vlagu, masti, ulja ili prljavštinu);
- preduzeti mere za smanjenje zaostalih napona u zavarenom spoju;
- koristiti pravilan redosled zavarivanja;
- usvojiti pravilan razmak u korenu žlebu nezavisno od vrste spoja (max 3 mm);
- posle nanošenja svakog zavara detaljno ga obiti i očišćiti površinu gusenice od troske.

Vodonik unet u zavareni spoj iz zavarivačke kupke može biti odstranjen difuzijom. Predgrevanje i visok unos toplote smanjuju brzinu hlađenja zavarenog spoja. Viša temperatura ubrzava difuziju i smanjuje količinu vodonika zaostalog u zavarenom spoju. Smanjenje brzine hlađenja smanjuje tvrdoću u ZUT-u i nivo zaostalih napona, što doprinosi smanjenju rizika od hladnih prslina.

Temperatura predgrevanja zavisi od količine unete toplote pri zavarivanju, veličine hemijskog ekvivalenta ugljenika i odvođenja toplote preko osnovnog materijala (debljina i pravci odvođenja toplote). Na in odvođenja toplote preko debljine i mesto merenje temperature prikazan je na slici 1.



Slika 1. Debljine elemenata spoja i odvođenja toplote; mesto merenja temperature

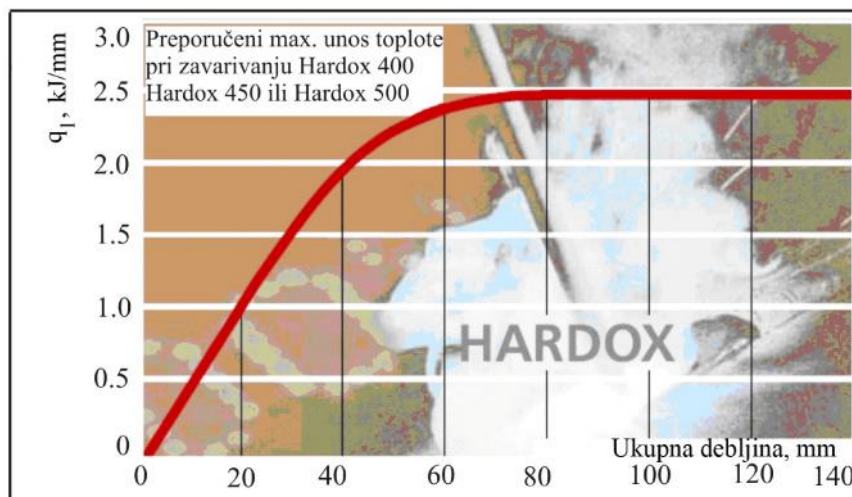
Preporučene temperature predgrevanja i mešovite temperature za Hardox elike, pri određenom količini unete toplote pri zavarivanju date su u tablici 4. Preporučena zona predgrevanja u okolini zavarenog spoja je sa obe strane u širini 75 mm, kao što je prikazano na slici 1.

Tabela 4. Preporučene temperature predgrevanja i mešovite temperature pri zavarivanju elika S355, Hardox i Weldox zavisno od debljine [2, 10]

...za različite debljine lima (mm)													Klasa čelika	Međuslojna temp.
$s_1 + s_2 + s_3 =$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120		
S355 (SS 2132)												75°C	S355 (SS 2132)	220-250°C
WELDOX 355													WELDOX 355	220-250°C
WELDOX 420/460				Sobna temperatura								75°C	WELDOX 420/460	220-250°C
WELDOX 500												75°C	WELDOX 500	200-225°C
WELDOX 700							75°C			100°C		150°C	WELDOX 700	200-225°C
WELDOX 900		75					100°C					150°C	WELDOX 900	150-175°C
WELDOX 960		75					100°C					150°C	WELDOX 960	150-175°C
WELDOX 1100		100		125°C			150°C					175°C	WELDOX 1100	150-175°C
HARDOX 400					75°C			100°C				175°C	HARDOX 400	150-175°C
HARDOX 450					100°C			125°C				175°C	HARDOX 450	150-175°C
HARDOX 500		100	125		150°C				175°C				HARDOX 500	150-175°C

Temperaturu predgrevanja treba održavati i kontrolisati u toku procesa zavarivanja. Granična debljina kada se ne primenjuje predgrevanje zavisi od napona tečenja osnovnog materijala. Posebnu pažnju treba obratiti na predgrevanje pri izvođenju pripoja i korenskih prolaza. Naknadno zagrevanje zavarenog spoja odmah posle zavarivanja, takođe omogućava lakše odvođenje vodonika iz zavarenog spoja. Temperatura za naknadno zagrevanje treba da bude ista kao temperatura za predgrevanje. Vreme zadržavanja treba da bude najmanje 5 min/mm debljine lima, ali ne manje od jednog sata.

Pri zavarivanju Hardox elika potrebno je voditi računa o ograničenom unosu toplote, kao najvažnijeg faktora za kontrolisanje hlađenja ZUT-a, za očuvanje strukturnog stanja i osobina postignutih kontrolisanim valjanjem i hlađenjem - koncept $t_{8/5}$ [11, 12]. U tom smislu date su preporuke (sl. 2.) za količinu unete toplote (q_l , kJ/mm), zavisno od vrste materijala i ukupne debljine, a za postizanje zadovoljavajuće kombinacije tvrdoće i žilavosti Hardox elika u ZUT-u [1-10].



Slika 2. Preporučene maksimalne količine unete toplote, zavisno od vrste materijala i ukupne debljine

Ukratko, manji ili veći unos toplote utiče na: žilavost ZUT-a, svojstva otpornosti i deformacije spoja, zaostale napone u zavarenom spoju i širinu ZUT-a.

Zavarivanje lima premazanog antikorozivnom osnovnom bojom može da dovede do pojave poroznosti. Poroznost se smanjuje na najmanju moguću u meru pravilnim odabirom tipa i debljine osnovnog premaza boje i primenom odgovarajućih parametara zavarivanja. U tom slučaju zavarivanje se izvodi bez ograničenja koje propisuju relevantni standardi i bez potrebe za uklanjanjem osnovnog premaza.

3. IZBOR DODATNOG MATERIJALA, POSTUPKA I PARAMETARA ZAVARIVANJA

3.1 Izbor dodatnog materijala

Pri zavarivanju elika klase Hardox treba koristiti dodatne materijale koji imaju povećanu žilavost, tj. napon tečenja ispod 500 MPa (tab. 5). Ako je šav izložen intenzivnom habanju, za završne slojeve mogu se koristiti elektrode za tvrdo navarivanje. Predgrevanje se može izbeći korišćenjem austenitnog nerđajućeg elika kao DM AWS 307 i AWS 309 [1, 2, 3, 13]. U tabeli 5 prikazani su podaci o izabranoj elektrodi za zavarivanje.

Tabela 5. Hemijski sastav žice, vrsta gasa i mehaničke osobine istog metala šava

Vrsta žice	Hemijski sastav, %						Smeša gasova Ar/CO ₂ , %	Mehaničke osobine istog metala šava			
SŽ Jesenice	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo		R _m , MPa	R _{eH} , MPa	A ₅ , %	KV, J
VAC 60	0.1	0.9	1.5	-	-	-	82/18	510 do 590	410 do 490	22 do 30	80 do 125

3.2 Izbor postupka zavarivanja

Uzimaju i u obzir debljinu lima, zavarljivost osnovnog materijala i energetske mogu nosti postupka zavarivanja, odabran je postupak poluautomatskog zavarivanja topljivom elektrodnom žicom u zaštiti aktivnog gasa (MAG).

3.3 Izbor zaštitnog gasa

Pri MAG/MIG zavarivanju, osim osnovnog i dodatnog materijala, važnu ulogu ima i izbor zaštitnog gasa ili smeše gasova. Danas se pretežno koriste gasne smeše za zaštitu zbog niza prednosti koje imaju u odnosu na iste gasove pri zavarivanju (olakšan prenos DM, lakše uspostavljanje elektri nog luka, smanjeno prštanje DM i tsl.). Kod svih metoda zavarivanja u zaštitnom gasu, njegov protok zavisi od svakog pojedina nog slu aja, pre svega debljine radnih predmeta i vrste spoja.

3.4 Izbor parametara zavarivanja

Izbor parametara zavarivanja izvodi se prema izrazima datim u [14]. U tablici 6. dati su prora unati energetski parametri MAG zavarivanja [3].

Tabela 6. Parametri MAG zavarivanja [3]

Parametar	Oznaka	Jedinica	Pripremak 1		Pripremak 2	Pripremak 3	
			koren	ispuna	ispuna	koren	ispuna
Površina popre nog peseka žleba	A	mm ²	14.143		16.287	16.287	
Površina popre nog preseka zavara	A _z	mm ²	29.3	29.3	36	29.9	35.2
Masa dužine zavara 1 cm	M	g	2.3	2.3	2.826	2.347	2.763
Koli ina pretopljene el. žice	m _{1.2}	g/s	0.709	0.709	2.069	1.670	2.013
Ja ina struje	I	A	207	207	207	315	315
Napon luka	U	V	19.9	19.9	19.9	24	24
Brzina zavarivanja	v _z	cm/s	0.709	0.709	0.732	0.711	0.729
Brzina topljenja el. žice	v _t	m/min	5.9	5.9	5.9	11.285	13.6
Linijska energija	q _l	J/cm	4938	4938	4783	9038	8815
Broj prolaza	n	-	1	1	1	1	1

3.5 Prora un temperature predgrevanja

Prora un temperature predgrevanja po pravilu izvodi se prema empirijskim izrazima razli itih autora kojima se utvr uje sklonost ka pojavi hladnih prslina u ZUT-u [14]. U ovom radu usvajana je na osnovu tabele 4 koju preporu uje proizvo a elika [2, 10].

4. PROCENA SKLONOSTI ELIKA HARDOX 450 KA NASTANKU PRSLINA

4.1 Procena sklonosti ka hladnim prslinama

Prora un brzine hla enja

Prora un brzine hla enja pri 300°C može se izvesti po obrascu Kotrela ili prema izrazima dobijenim rešavanjem parcijalne diferencijalne jedna ine prostiranja toplote (v_{300} , °C/s) [3, 14]. Rezultati prora una prikazani su u tablici 7 [3].

Tabela 7. Rezultati prorauna stvarne brzine hlađenja pri 300°C [3, 14]

v_h - po obrascu Kotrela						
T _o , °C	Oznaka plo e	q _i , J/cm	s, mm	N	v_h , °Cs ⁻¹	
20	Plo a 1	4931.56	6	1,890	7.371	
20	Plo a 2	4783.34	6	1.890	7.769	
20	Plo a 3 (korenski zavar)	9038	6	1.890	2.492	
20	Plo a 3 (zavar ispune)	9916.7	6	1.890	2.10	
v_{300} - na osnovu analiti kih izraza*						
T _p , °C	Oznaka plo e	N ₂	N ₃	P _x	T _K , °C	v_{300} , °Cs ⁻¹
151	Plo a 1	0.75	0.75	0.0725	151	0.615
151	Plo a 2	1.5	1.5	0.037	151	0.327
151	Plo a 3 (korenski zavar)	1.5	1.5	0.037	151	0.091
151	Plo a 3 (zavar ispune)	1.5	1.5	0.037	151	0.076
v_{kr} - po Majneru*						
T _p , °C	Oznaka plo e	k	N ₃	v_{kr} , °Cs ⁻¹	Napomena	
151	Plo a 1	3.0	0.75	6.674	Tanka plo a	
151	Plo a 2	3.0	1.5	6.674	Tanka plo a	
151	Plo a 3 (koreni zavar)	3.0	1.5	6.674	Tanka plo a	
151	Plo a 3 (zavar ispune)	3.0	1.5	6.674	Tanka plo a	

* pri čemu su usvojene sledeće termo-fizičke konstante: $\rho = 0.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, ... $\cdot c = 5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Proraunate vrednosti brzine hlađenja zavarenog spoja (tab. 7) omogućuju procenu sklonosti ka nastanku hladnih prslina primenom odgovarajućih analitičkih izraza (tab. 8, 9 i 10) [14].

Tabela 8. Verovatnoća pojave hladnih prslina prema japanskim autorima [3]

Oznaka ploče	P_C %	P_W %	P_{CM} %	H_2 ml/100g	Temperatura predgrevanja, $^\circ\text{C}$	Uslov sklonosti	Napomena
Ploča 1 Ploča 2 Ploča 3	0.336	0.327	0.276	3	151	$0.25 < P_C < 0.5$	sklon je

Tabela 9. Verovatnoća pojave hladnih prslina prema škim autorima [3]

Oznaka ploče	P_{hp}	P_{CM} %	H_2 ml/100g	Temperatura predgrevanja, $^\circ\text{C}$	Uslov sklonosti	Napomena
Ploča 1 Ploča 2 Ploča 3	0.287	0.276	3	151	$P_{hp} > 0.24$	sklon je

Tabela 10. Verovatnoća pojave hladnih prslina prema parametru P_S [3]

Oznaka ploče	T_P °C	ν_{300} °C s ⁻¹	ν_{kr} °C s ⁻¹	H_2 ml/100g	s mm	P_S	Uslov sklonosti	Napomena
Ploča 1	20	0.615	6.674	3	6	-0.656	$P_S < -0.5$	nije sklon
Ploča 2	20	0.327	6.674	3	6	-0.931	$P_S < -0.5$	nije sklon
Ploča 3 (koren)	20	0.091	6.674	3	6	-1.486	$P_S < -0.5$	nije sklon
Ploča 3 (ispuna)	20	0.076	6.674	3	6	-1.564	$P_S < -0.5$	nije sklon

4.2 Procena sklonosti ka toplim prslinama

Sklonost elika ka obrazovanju toplih prslina utvrđuje se na osnovu parametara CE_m i H.C.S. [3, 14]. Rezultati proračuna prema ovim parametrima dati su u tablici 11.

Tabela 11. Ocena sklonosti elika ka obrazovanju toplih prslina [3, 14]

elik	Parametar	Izraz	Vrednost	Uslov sklonosti	Napomena
Hardox 450	CE_m	2.28	0.243	$>0.45\%$	nije sklon
	H.C.S.	2.29	0.14	>2	nije sklon

4.3 Procena sklonosti ka obrazovanju prslina žarenja

Ocena sklonosti elika prema prslinama žarenja određuje se na osnovu parametarskih izraza [3] za proračun G i P_z . Rezultati su prikazani u tablici 12.

Tabela 12. Ocena sklonosti elika ka obrazovanju prslina žarenja [3]

elik	Parametar	Izraz	Vrednost	Uslov sklonosti	Napomena
Hardox 450	G	2.36	0	$G \geq 0$	nije sklon
	P_z	2.37	-1.811	$P_z > 0$	nije sklon

4.4 Procena sklonosti ka obrazovanju lamelarnih prslina

elik se smatra otpornim na lamelarne prsline ako je prema izrazu za P_L , datom u literaturi [14] vrednost parametara $P_L \geq 0.40$. Vrednost parametra P_L za elik Hardox 450 je prikazan u tablici 13.

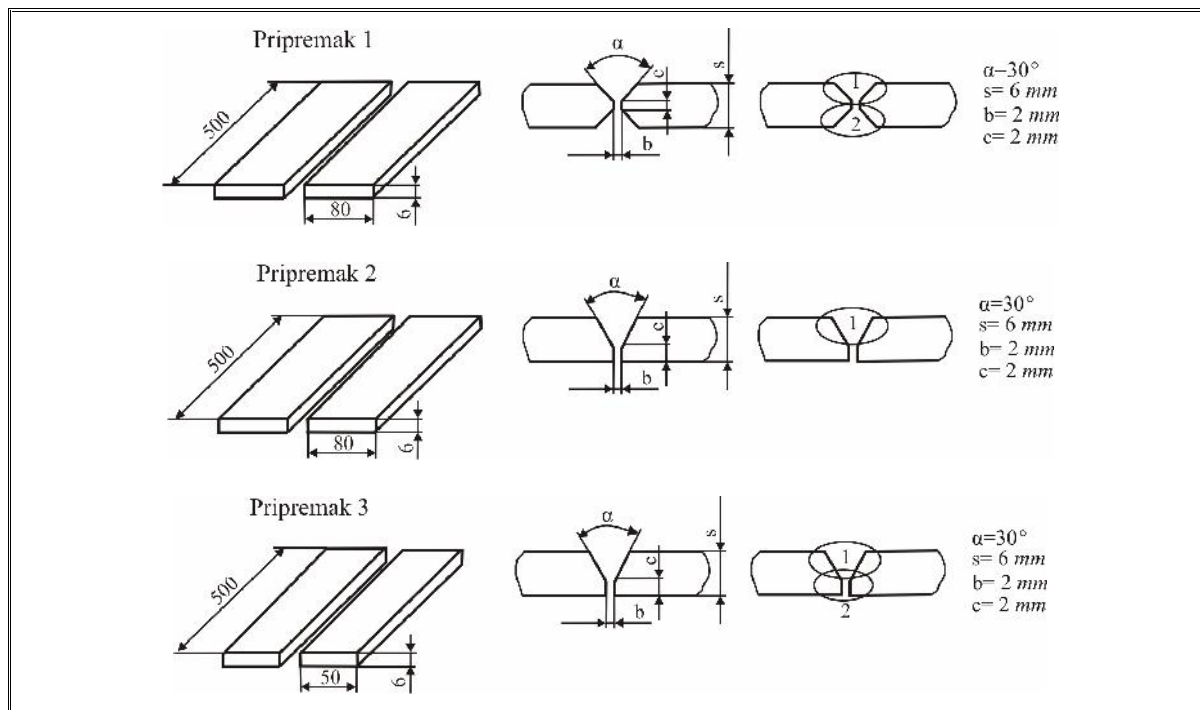
Tabela 13. Ocena sklonosti elika ka obrazovanju lamelarnih prslina [3]

elik	Parametar P_L	Uslov sklonosti	Napomena
Hardox 450	0.338	$P_L \geq 0.40$	Nije sklon

5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

5.1 Priprema za zavarivanje

Priprema ploha za zavarivanje podrazumeva redosledom utvrđen potreban broj tehnoloških operacija s ciljem pripreme ploha za izvođenje zavarivanja. Iвица žleba kao i okolina na rastojanju od najmanje 10 mm moraju biti očišćeni do metalnog sjaja.



Slika 3. Dimenzije ploha, oblik i dimenzije žlebova sa redosledom izvođenja prolaza

Veoma je važno da se ostvari ujednaeni razmak između pripremljenih ploha. Priprema obuhvata sledeće radnje: sečenje ploha, očišćenje ploha i pripajanje ploha. Dimenzije ploha, kao i oblik i dimenzije žlebova sa redosledom izvođenja prolaza za suve zavarivanje priprema 1, 2 i 3 su prikazani na slici 3. Pre samog zavarivanja u cilju fiksiranja radnih komada MAG-postupkom, za priprema 1 i 2 izvedena su po tri pripoja, od kojih je svaki dužine 10 mm (sl. 4). Kod trećeg priprema izvedena su 5 pripoja dužine 15 mm. U toku izvođenja pripoja konstantan razmak u korenu žleba je održavan distantnim limovima debljine 2 mm.

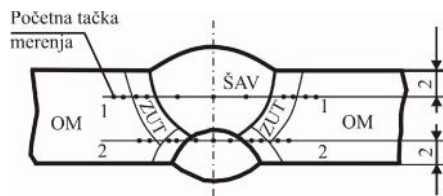


Slika 4. Mesta izvođenja pripoja za priprema 1 i 2 u dužini 3x 10 mm

6. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA I MERENJE TVRDO E

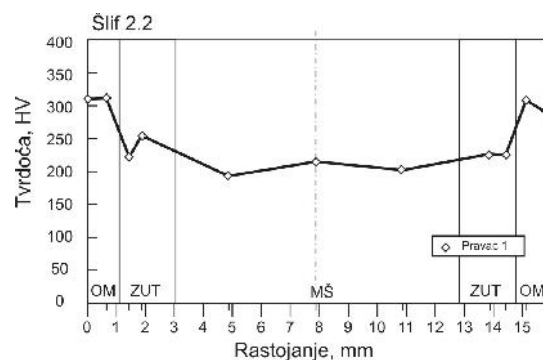
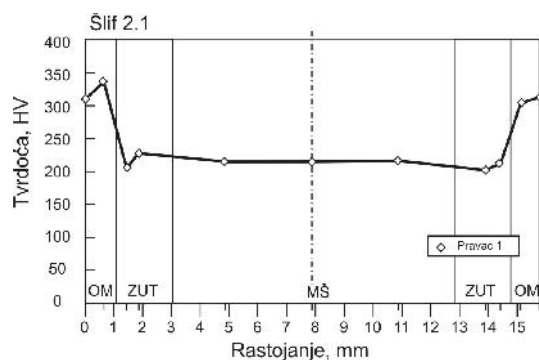
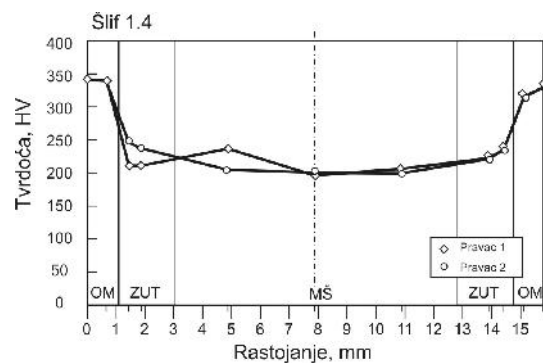
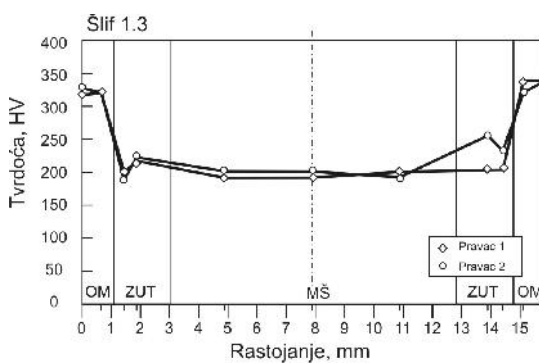
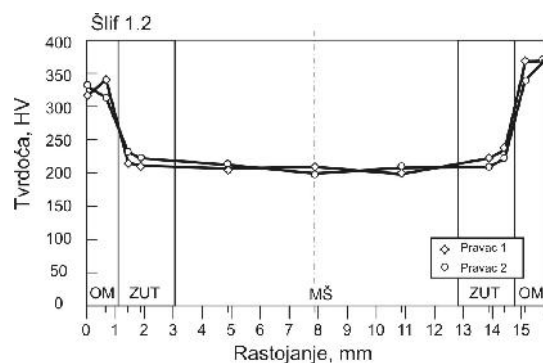
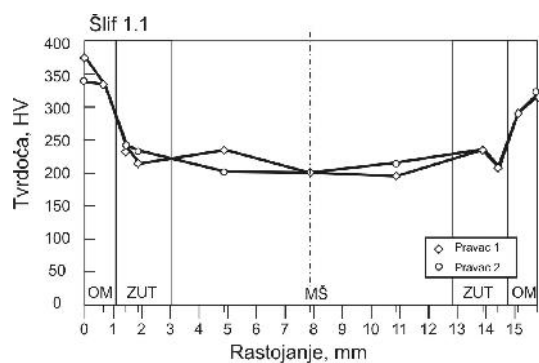
6.1 Merenje tvrdo e

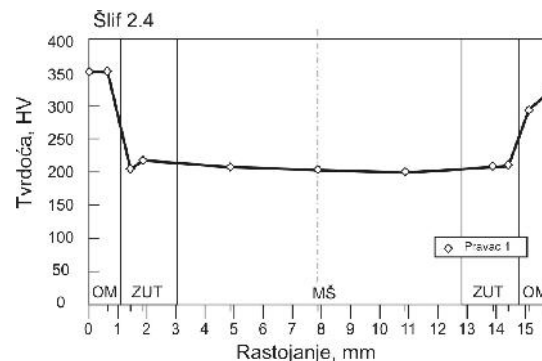
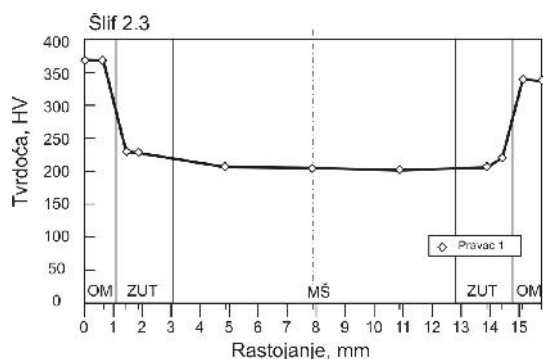
Za merenje tvrdo e u pojedinim zonama zavarenog spoja, pripremljeni su metalografski izbrusci, na kojima je merena mikrotvrdo a i određivana mikrostruktura, izvedenih dvoslojnim i jednoslojnim zavarivanjem. Merenje tvrdo e izvedeno je po Vickers metodi (HV_5), prema slici 5.



Slika 5. Shema merenja tvrdo e

Dijagrami raspodele tvrdo e u zavarenom spoju za pripremak 1 i 2, prikazani su na slici 6.





Slika 6. Raspodela tvrdoće HV u zavarenim spojevima različitih metalografskih izbrusaka [3]

Sa dijagrama raspodele tvrdoće (sl. 6) započinje se da su maksimalne tvrdoće u ZUT-u, odnosno šavu, znatno manje od prosečne vrednosti tvrdoće osnovnog materijala. Ovo unekoliko odstupa od najčešćeg zahteva za ravnomernošću u raspodeli svojstava spoja. Međutim, kako su maksimalne vrednosti tvrdoće ZUT-a znatno manje od 350 HV, pojava martenzitne mikrostrukture u zavarenom spoju se ne očekuje, pa samim tim nema uslova za nastanak hladnih prslina. Međutim, i pored činjenice da nije došlo do pojave nepovoljne martenzitne strukture u zavarenom spoju, došlo je do nastanka neželjenih pojava u vidu pada tvrdoće i jačine u ZUT-u i metalu šava. Pad tvrdoće i jačine u metalu šava i ZUT-u može se objasniti neravnomernim procesom zagrevanja i hlađenja pojedinih zona zavarenog spoja, koji znatno odstupaju od postupka primarnog dobijanja elika. Neravnomernost mehaničkih osobina pojedinih zona zavarenog spoja posledica je postojanja neravnomernog temperaturnog polja i nepovoljnog termičkog ciklusa. Zavisno od količine unete toplote, nastaje nepovratno narušavanje stanja termo-mehaničke obrade, sniženje žilavosti i omekšavanje usled neravnomernog temperaturnog ciklusa. Područje manje tvrdoće u ZUT-u može biti kritično u pogledu loma, a naročito se to pokazalo opasnim na zamorni lom zbog koncentracije naprezanja.

Iz ovih razloga pri zavarivanju elika Hardox 450 neophodno je održavanje usko ograničene količine unete toplote, održavanje mekane uslojne temperature, izbor najpovoljnijeg vremena hlađenja $t_{8/5}$ i ograničenja u pogledu primene naknadne termičke obrade posle zavarivanja [1, 2, 3, 11, 12].

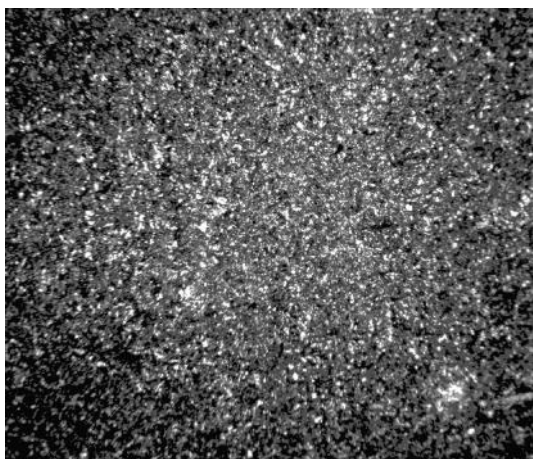
6.2 Makroskopska i mikroskopska ispitivanja

Makroskopska ispitivanja

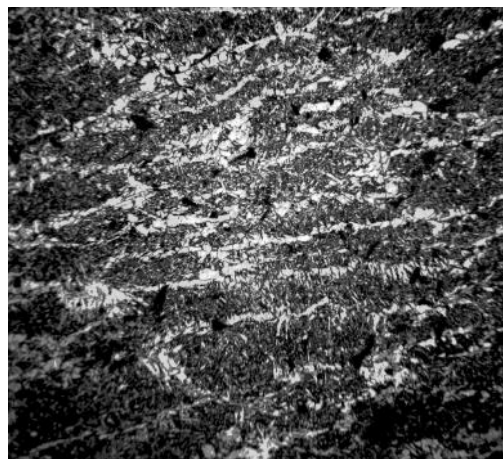
Makroskopska ispitivanja se sastoje u vizuelnom pregledu uzoraka ili pomoću lupe sa manjim povećanjem (do 20×). Makrostruktura može biti ispitivana neposredno na površini komada ili detalja, na prelomu ili izrezanom uzorku posle odmašivanja, brušenja i nagrizanja površine adekvatnim hemijskim reagensima. Nagrizanje omogućava da se uoči metalna šava, ZUT i osnovni materijal.

Mikroskopska ispitivanja

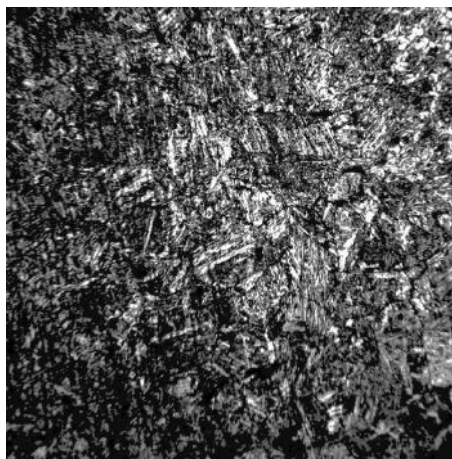
Za snimanje i određivanje mikrostrukture karakterističnih zona spoja (sl. 7) korišćen je optički mikroskop REICHERT, uvećanja 50 do 1000×. Može se zapaziti da je mikrostruktura ZUT-a prikazana na slici 7c ocenjena kao Vidmanštetenova. Pojava nepovoljne Vidmanštetenove mikrostrukture u zavarenom spoju je nepoželjna, pošto smanjuje njegove mehaničke osobine u prvom redu udarnu žilavost. To ukazuje da treba korigovati tehnologiju zavarivanja.



a) OM - Me u faza struktura poboljšanja (200×)



b) Šav- Ferit i lamelarni perlit (200×)



c) ZUT - Vidmanštetenova struktura (200×)

Slika 7. Mikrostruktura pojedinih zona spoja [3]

7. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja ukazuju na kompleksnost problema izbora najpovoljnije tehnologije zavarivanja elika Hardox 450 sa posebnim osvrtom na izlazna svojstva ZUT-a kao najkritičniju oblast zavarenog spoja. Iz ovih rezultata proizlazi da količina unete toplote pri zavarivanju navedenog elika zavisi pre svega od debljine ploče i broja prolaza, te u tom smislu treba posmatrati i realno zavarivanje ovog elika. Na osnovu izvedenih eksperimenata, kao i dosadašnjih saznanja i iskustava iz prakse, došlo se do saznanja da je povoljnije zavarivanje u više prolaza kada je reč o niskolegiranim elicima povišene i navedene debljine. Osim toga, pri višeprolaznom zavarivanju nastaje i transformacija nepovoljnih struktura ostvarenih posle prvog prolaza u povoljnije strukture, zbog uticaja unete toplote drugog prolaza - efekat otpuštanja. Na ovaj način se dobijaju i povoljnije mehaničke osobine pojedinih zona zavarenog spoja. Mišljenja smo da rezultati ovog rada mogu korisno poslužiti stručnjacima koji se u praksi sreću sa izradom zavarenih konstrukcija od ove klase elika.

8. LITERATURA

- [1] Jovanovi , M., Lazi , V.: Uputstvo za zavarivanje elika povišene jačine, elik: Hardox 500, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Beograd/Kragujevac, 2008.
- [2] Larsson, T. B., Berglund, T.: Handbook on WELDING of Oxelösund steels, October 1992, Sweden.
- [3] Borovi , D.: Ocena tehnološko–metalurške zavarljivosti elika povišene jačine, specijalisti ki rad, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2010.
- [4] Clarin, M.: High Strength Steel - Local Buckling and Residual Stresses, Luleå University of Technology, Luleå, Novembar 2004.
- [5] Determination of suitable minimum preheating temperature for the cold-crack-free welding of steels. IIW-Doc. IX-1631-91.
- [6] Determination of the effect of welding on the toughnesses in the heat-affected zone of welded joints. IIW-Doc. IX-1340-84.
- [7] Determination of the effect of welding on the maximum hardness in the heat-affected zone of welded joints. IIW-Doc. IX-1342-84.
- [8] Müsgen, B., High strength quenched and tempered steels-production, properties and applications. Metal Construction (1985), pp. 495-500.
- [9] Müsgen, B. und Hoffmann K.: Improvement of the fatigue strength of welded high strength steels. Thyssen Technische Berichte (1979), Heft 1, pp. 67-79.
- [10] <http://www.ssabox.com> (2009.)
- [11] Josifovi , D., Jovanovi , M., Lazi , V.: Optimizacija režima zavarivanja elika povišene jačine, Prvi meunarodni naučno-stručni skup "Teška mašinogradnja", Kruševac-Vrnjačka Banja, Jugoslavija, Oktobar 1993., str. 340-345.
- [12] Lazi , V., Sedmak, A., Živkovi , M., Aleksandrovi , S., Uki , R., Jović , R., Ivanovi , 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.
- [13] Katalozi proizvoda a dodatnog materijala: SŽ Fiprom Jesenice Slovenija, Piva Plužine Crna Gora, Elavaco Bijeljina Republika Srpska – BiH i dr.
- [14] Jovanovi , M., Adamovi , D., Lazi , V.: Tehnologija zavarivanja-priručnik, drugo izdanje, pomoćni univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2011.