

SKLONOST VISOKOČVRSTOG ČELIKA S 960QL NA POJAVU TOPLIH I LAMELARNIH PUKOTINA

TEDENCY OF HIGH STRENGHT STEELS S960QL ON OCCURRANCE OF HOT AND LAMELLAR CRACKS

Doc.dr.sc.Abaz Mandjuka¹,Mr.sc.Ante Čorić²

¹Univerzitet u Zenici,BiH,abaz.mandjuka@gmail.com

²BNT-TMiH Novi Travnik,BiH,anto.coric.nt@gmail.com

REZIME

Cilj istraživanja je bio napraviti procjenu sklonosti čelika S 960QL na pojavu toplih pukotina i pucanja lamela usljed zavarivanja, kao i praktičnu primjenu Window i Vareststraint metoda, koje se koriste u praksi kao eksperimentalne metode za procjenu čelika na pojavu toplih i lamelarnih pukotina. Detekcija mogućih pukotina provedena je metalografskom analizom na zavarenim epruvetama. Na makro snimcima nisu primječeni nikakvi tragovi diskontinuiteta tipa toplih i lamelarnih pukotina. Pored eksperimentalne procjene sklonosti čelika na pojavu pomenutih pukotina, urađena je i računska procjena postojećim matematičkim modelima.

Ključne riječi: čelik S960QL, tople pukotine, lamelarne pukotine, makro analiza

ABSTRACT

The aim of this paper was to make an assessment of preferences of steel S960QL on occurrence of hot cracks and lamellar tearing due to welding, as well as the practical application of Window and Vareststraint methods, which are used in practice as an experimental method to assess the occurrence of hot steel and lamellar cracks. Detection of possibly cracks was carred out by macro analysis on welded specimens. On macro specimens had not been noticed a mistakes such as hot and lamellar cracks. Besides the experimental evaluation preferences steel on the occurrence of the aforementioned cracks, we also made the calculation and assessment of the existing mathematical models.

Keywords: steel S960QL, hot cracks, lamellar tearing, macro analysis

1. UVOD

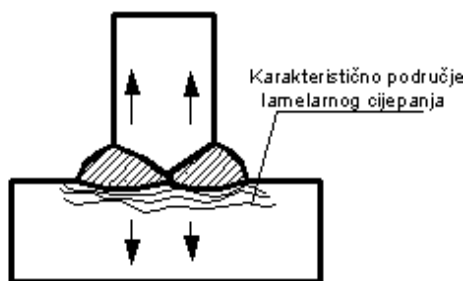
Područje primjene čelika S 960QL (EN 10025 – 6, 2005 ili DIN TSt E960) vrlo je široko. Primjenjuje se kod izgradnje dizalica, mostova, kranova, off-shore postrojenja, vozila itd. Zbog povećanja omjera čvrstoće prema masi, prvenstveno se primjenjuju na konstrukcijama gdje se teži ka smanjenju mase konstrukcije i uštedi materijala. Proizveden je kaljenjem i popuštanjem s niskougljičnom martenzitnom strukturom, koja je najpogodnija za postizanje zadovoljavajuće kombinacije čvrstoće i žilavosti. Međutim procjena sklonosti čelika S960QL na pojavu toplih pukotina i pucanja lamela bitan je čimbenik sa aspekta njegove zavarljivosti. Lamelarne pukotine prvenstveno nastaju u zoni utjecaja topline i obično se šire prema osnovnom materijalu. Nastaju tijekom hlađenja zavarenog spoja na relativno niskim temperaturama. Praksa je pokazala da se takve pukotine mogu pojaviti i poslije zavarivanja u eksploatacijskim uvjetima kao zakašnjele lamelarne pukotine.

Tople pukotine se javljaju na izrazito visokim temperaturama, od temperature kristalizacije pa naniže. To je područje gdje dolazi do naglog smanjenja deformacione sposobnosti metala zavara i jakog inteziteta djelovanja zaostalih napreznja. Tople pukotine, koje nastaju u području metala zavara zovu se kristalizacijske, jer nastaju u tijeku kristalizacije zavarivačke kupke. Tople pukotin, koje se pojave u području ZUT-a i zavara su podsolidusne ili likvacijske. Prisustvo niskotopivih eutektikuma u čeliku, uključaka troske, dvoplatnosti materijala, pogrešna geometrija zavara, pogrešan odabir dodatnog materijala, ukrućenost zavarenog spoja, prevelik unos topline tijekom zavarivanja, glavni su uzročnici nastanka toplih i lamelarnih pukotina. Za procjenu sklonosti čelika na pojavu toplih i lamelarnih pukotina svjetski eksperti iz područja zavarivanja razradili su različite eksperimentalne i računске metode.

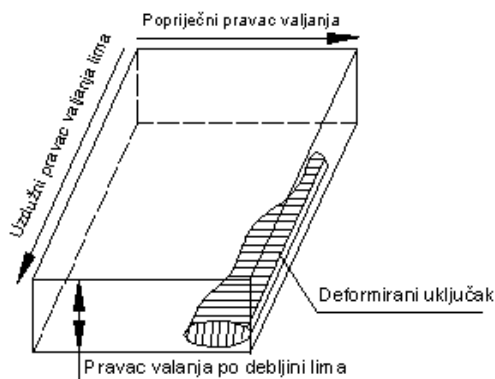
U ovom radu sklonost čelika S960QL na pojavu toplih pukotina utvrđena je eksperimentalno, primjenom Vareststraint metode, a sklonost na lamelarne pukotine metodom Window. Napravljena i računska procjena sklonosti za oba tipa pukotina, što je omogućilo da se napravi usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i rezultata procjenjenih matematičkim metodama.

2. LAMELARNE PUKOTINE

Lamelarno cijepanje se vrlo teško uočava na konstrukciji, a njihovo otklanjanje je teško i skupo [1]. Zato je procjena sklonosti čelika na nastanak lamelarnih pukotina važan faktor za ocjenu zavarljivosti. Danas problem lamelnog cjepanja postaje predmetom širokih istraživanja posebno u industrijski razvijenim zemaljama [3]. Lamelarno odvajanje nastaje u zoni utjecaja topline i obično se širi prema osnovnom materijalu, a posljedica je postojanje nehomogenosti u osnovnom materijalu i djelovanja toplinskih napreznja usljed zavarivanja. Nehomogenosti su nemetalnih uključci tipa sulfida, silikata, oksida i dr. koji se u procesu valjanja čelika deformiraju u obliku pločica – lamela, ili se linijski izdužuju, što uzrokuje anizotropiju osobina osnovnog materijala, slika 2 [1, 2]. Na slici 1. prikazano je karakteristično lociranje lamelarne pukotine u zavarenom spoju, dok na slici 2. je prikazan izgled deformiranog uključka nastalog nakon valjanja lima. Prevelik unos topline treba izbjegavati, jer uzrokuje jaka toplinska napreznja pogodna za nastanak lamelarnih pukotina. Međutim dalja istraživanja su pokazala da stupanj ukrućenosti zavarenog spoja predstavlja jedan od najvećih problem na nastanak lamelarnih pukotina [3]. Istraživanja su pokazala da lamelarne pukotine nastaju tijekom hlađenja zavarenog spoja na relativno niskim temperaturama. Međutim praksa je pokazala da se takve pukotine mogu pojaviti i poslije zavarivanja u eksploatacijskim uvjetima kao zakašnjele lamelarne pukotine.



Slika 1. Shematski prikaz lociranja lamelarne pukotine [2]



Slika 2. Izgled deformiranog uključka nakon valjanja lima [2]

2.1. Metode ispitivanja sklonosti na lamelarno pucanje

Za ocjenu čelika na lamelarne pukotine koriste se metode sa i bez razaranja. Metoda bez razaranja koja je danas našla široku primjenu, jeste kontrola čelika ultrazvukom. Ultrazvučnim ispitivanjem mogu se odrediti lokalna mjesta raspodjele uključaka, odnosno najosjetljiviji dio lima koji se kasnije podvrgava ispitivanju sa razaranjem [1,3]. Prema mišljenju većine autora ispitivanje ultrazvukom treba koristiti u svojstvu ulazne kontrole, a ne kao ispitnu metodu za određivanje sklonosti na lamelarno pucanje. Istražujući problematiku lamelarnih pukotina istražitelji su razvili različite eksperimentalne metode sa razaranjem pripremljenih uzoraka. Najširu primjenu imaju metode koje preporučuje IIW, na osnovu kojih su provedena mnogobrojna ispitivanja čelika, pri čemu je i izvršena njihova klasifikacija [1, 4]. Window metoda, metoda po Kanazawi, Cranfield metoda i dr. danas se najviše prakticiraju. Pored eksperimentalnih metoda za ispitivanje čelika na lamelarne pukotine koriste se i parametarske jednačbe predložene od strane japanskih istraživača. Prema ovim jednačbama, sklonost na lamelarne pukotine izražava se u funkciji kemijskog sastava osnovnog materijala, sadržaja difuzijskog vodika, površinskih diskontinuiteta, odnosno preko parametra P_L :

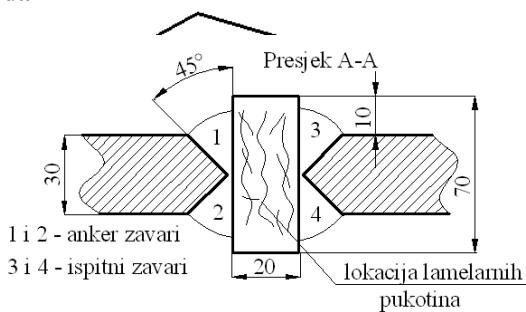
$$P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + 6S \quad (1) \quad P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{L}{7000} \quad (2)$$

gdje je: P_L – parametar sklonosti na lamelarno cijepanje, P_{CM} – ugljikov ekvivalent prema Ito i Bessyo, H – sadržaj difuzijskog vodika (ml/100g zavara), S – sadržaj sumpora (%),

L – ukupna dužina uključka na jedinici površine presjeka ($\mu \cdot \text{mm}^{-2}$)

Ako po prvoj jednačbi čelik ima vrijednost $P_L \leq 0.40$, a po drugoj $P_L \leq 0.35$ može se smatrati otpornim na lamelarno cijepanje [1, 4]. Pošto ove parametarske jednačbe ne uključuju ostale uticajne faktore prihvatljive su kao polazna informacija o sklonost čelika na lamelarno pucanje.

2.1.1. Window metoda



Slika 3. Window metoda [1 , 4]

Ispitivanje po ovoj metodi zasniva se izazivanju lamelarnih pukotina pod utjecajem naprežanja u pravcu debljine lima. Proba se sastoji od čelične okvirne ploče sa otvorom u sredini (Window) u koji se postavi ispitni uzorak i zavari sa okvirnom pločom po dužnim stranama, slika 3 [1, 2]. U prorezu okvirne ploče gdje se vrši zavarivanje, napravi se "K" priprema, u koju se postavlja ispitni uzorak i zavari anker zavarima 1 i 2 , nakon čega se nastavlja zavarivanje ispitnih zavara 3 i 4, istim parametrima. Izgled presjeka Window probe prikazan je na slici 3 [2]. Nakon zavarivanja iz zavarenog spoja se izrežu tri presjeka, koji se smanje na potrebne dimenzije za metalografsku analizu. Po pravilu, pukotine bi trebalo da se pojave po presjeku ispitnog uzorka , slika 3 [2]. Rezultati se iskazuju kao procentualni odnos između ukupne dužine svih pukotina i ukupne dužine svih zavara.

$$\text{udio pukotina} = \frac{\Sigma l}{\Sigma L} \cdot 100 \%$$

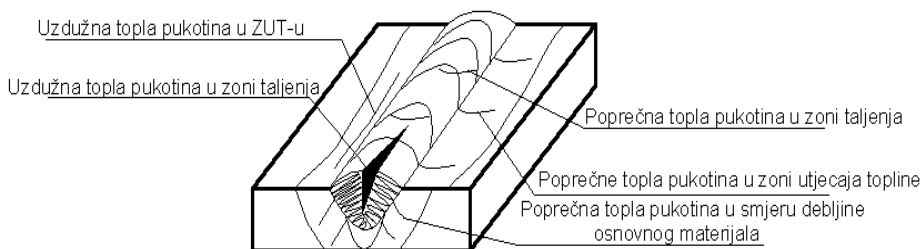
Σ L-ukupna dužina pukotina,
 Σ L-ukupna dužina zavora

3. TOPLE PUKOTINE

Pod pojmom toplih pukotina podrazumjevaju se pukotine koje nastaju u visokim temperaturnim intervalima. To je područje u kome dolazi do naglog smanjenja deformacione sposobnosti metala zavora. Prema lokaciji nastanka mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: kristalizacijske i podsolidusne ili likvacione pukotine

Kristalizacijske pukotine nastaju tijekom kristalizacije zavora, kada se metal nalazi u dvofaznom, čvrsto – tečnom stanju, dok se podsolidusne pukotine formiraju u metalu koji je već očvrstnuo. Podsolidusne pukotine pored metala zavora mogu da se pojave i u zoni utjecaja topline ZUT-u. Tople pukotine nastaju djelovanjem mehaničkih i metalurških čimbenika, pa su se istraživanja odvijala u dva pravca – tehnološka i metalurška. Tehnološki koncept istraživanja temelji se na sposobnosti materijala da se deformira. Prema metalurškom konceptu sklonost metala na pukotine ovisi od prisustva, odnosno odsustva tečnih međukristalnih slojeva za vrijeme porasta vlačnih naprezanja [1,2,5]. Do danas su provedena mnogobrojna istraživanja sa ciljem otkrivanja uticajnih faktora na nastanak toplih pukotina, što je dovelo do različitih interpretacija o mehanizmu nastanka pukotina, posebno kristalizacijskih [1]. Prema pravcu prostiranja pukotine mogu da budu poprečne i uzdužne, slika 4. Pri razmatranju mehanizma nastanka toplih pukotina konstatirano je da se formiraju pod utjecajem različitih čimbenika, čije je zajedničko dejstvo dosta složeno.

Istovremeno ispitivanje svih čimbenika je praktično neizvodljivo, što znači da ne postoji univerzalna metoda kojom bi se obuhvatili svi relevantni čimbenici, i na osnovu koje bi se mogla odrediti sklonost čelika na nastanak toplih pukotina.



Slika 4. Tople pukotine u zavarenom spoju [1,2,4]

3.1. Metode ispitivanja sklonosti na nastanak toplih pukotina

Danas su razvije mnogobrojne metoda kojima se ispituju određeni utjecaji na nastanak toplih pukotina [1,5]. Kako pukotine mogu nastati u zavaru i ZUT-u kao podužne i poprečne, tako su i metode prilagođene za određivanje pojedini tipova pukotina, uzimajući u obzir mehanizam njihovog nastanka. Po karakteru ocjene metode mogu da budu izravne i neizravne. Izravne metode su eksperimentalne probe, gdje se određuju različiti kriteriji za kvantificiranje sklonosti materijala na nastanak toplih pukotina. Metode tipa Vareststraint, Transvareststraint, kružna metoda po Thomasu i dr. su metode koje se danas dosta koriste u praksi. Kriterijum ocjene može da bude kvalitativan i kvantitativan. Kvalitativnom ocjenom se konstatira ima li pukotina ili nema, a kvantitativna ocjena definira broj pukotina, veličinu pukotina i dr. Neizravne metode ne mogu dati pravu procjenu sklonosti čelika na pojavu toplih pukotina, ali se zato kod ispitivanja obično koriste obe metode i dobiveni rezultati

uporede [1,2]. Neizravne metode su matematički modeli koji uključuju kemijski sastav materijala. Za procjenu sklonosti čelika na tople pukotine koristi se orijentacijska formula [3]:

$$H.C.S. = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} \quad (3)$$

Prema parametru H.C.S. (Hot Cracking Sensitivity) važi slijedeći kriterij:

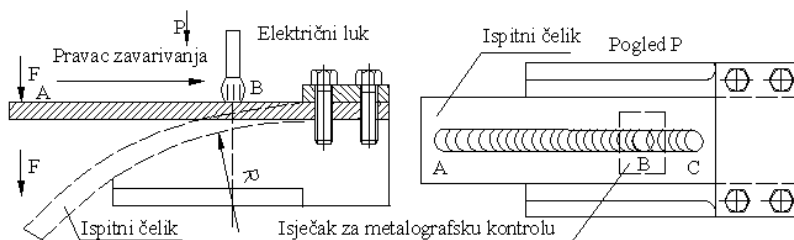
- zavareni spoj je otporan na tople pukotine ako je H.C.S. < 4, za čelike sa $R_m < 700$ MPa,
- zavareni spojevi od čelika visoke čvrstoće $R_m > 700$ MPa, otporni su na tople pukotine ako je parametar H.C.S. < 2. Od mnogobrojnih neizravnih metoda za ispitivanje toplih pukotina, koje su do danas razvijene, samo određen broj je našao širu primjenu u praksi.

3.1.1. Vareststraint metoda (Variable Restraint)

Vareststraint metoda je jedna od najpoznatiji metoda za ispitivanje sklonosti čelika na pojavu toplih pukotina. Prvenstveno se koristi za procjenu poprečnih toplih pukotin[1,3]. Razvili su je W. F. Savage i C.D. Lundin 60- tih godina u Institutu Rensselear Polytechnic. Na slici 5. shematski je prikazana Vareststraint metoda.

Princip ispitivanja je da se u tijeku navarivanja ispitnog uzorka izvrši njegova deformacija vanjskom silom, koja će zajedno sa primjenjenim zavarivačkim parametrima inicirati pukotinu, slika 5. Jedna strana uzorka dimenzija 220x50x10 mm, učvrsti se u oslonac, dok druga strana ostaje slobodna. Zatim se duž centralne linije uzorka izvodi navarivanje od točke A do točke B. Kada električni luk dođe u točku B ispitni uzorak se naglo savija pod djelovanjem vanjske sile F, prilagođavajući ispitni uzorak radijusu zakrivljenja. Električni luk se i dalje kreće do točke C, slika 5. Savijanje ispitnog uzorka sa navarom izazvat će deformaciju gornjih vlakana navarenog sloja. Stupanj deformacije izračunava se pomoću izraza[1, 4]: $\varepsilon = t / 2R \cdot 100$ %, gdje je, t – debljina lima, mm i R – radijus savijanja, mm

Promjenom radijusa savijanja može se mijenjati i veličina deformacija gornjih slojeva navara. Deformacija vanjskih vlakana navara uobičajeno se kreće od 0.4 do 6.30 % [1, 3]. Tople pukotine nastaju za vrijeme savijanja ispitnog uzorka u sredini metala zavara ili ZUT-u, u onom dijelu koji je bio na granici tečne i čvrste faze. Nakon završenog zavarivanja i hlađenja ispitni uzorak se podvrgava ispitivanju. Ispitivanje se provodi metalografskom analizom, tako da se iz zavarenog uzorka isjeca segment veličine 40x40 mm. Metoda omogućava procjenu sklonosti na nastanak toplih pukotina za različite vrste čelika, dodatnih materijala i različite postupke zavarivanja.



Slika 5. Shematski prikaz Vareststraint metode [1,5]

4. RAČUNSKA PROCJENA SKLONOSTI ČELIKA S 960QL NA POJAVU TOPLIH I LAMELARNIH PUKOTINA

Da bi mogli napraviti računsku procjenu sklonosti čelika na pojavu ovog tipa grešaka kod zavarivanja, potrebno je poznavati kemijski sastav čelika. U tablici 1. prikazan je kemijski sastav osnovnog materijala određene šarže.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika S 960QL [6]

Maseni udio, % (šarža 687913)														
C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	Al	B	Cu	N	Nb	Ni	Ti	V
0.17	0.39	1.43	0.008	0.0010	0.58	0.46	0.039	0.0002	0.020	0.0044	0.024	0.040	0.005	0.020

4.1. Procjena na lamelarne pukotine

$$P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + 6S \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + Mn/20 + Mo/15 + Ni/60 + Cr/20 + V/10 + Cu/20 + Si/30 + 5 \cdot B$$

Izračunata vrijednost $P_{CM} = 0.310$, s obzirom na kemijski sastav čelika, tablica 1. za $H = 4$ ml/100gr. depozita, $S = 0.0010$ %, izračunata vrijednost parametra, $P_L = 0.382 < 0.4$

Budući da je $P_L = 0.382 < 0.4$ matematička procjena je, da čelik nije osjetljiv na pojavu lamelarnih pukotina. Međutim izračunata vrijednost $P_L = 0.382$ dosta je visoka sa vrlo malim odstupanjem od kritične vrijednosti $P_L = 0.4$, što stvara sumnju u računsku procjenu.. Indikativo je da vrijednost parametra pukotine raste sa povećanjem sadržaja sumpora u čeliku i vodika u dodatnom materijalu. To ukazuje na činjenicu, da kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće treba strogo voditi računa o sadržaju vodika u dodatnom materijalu.

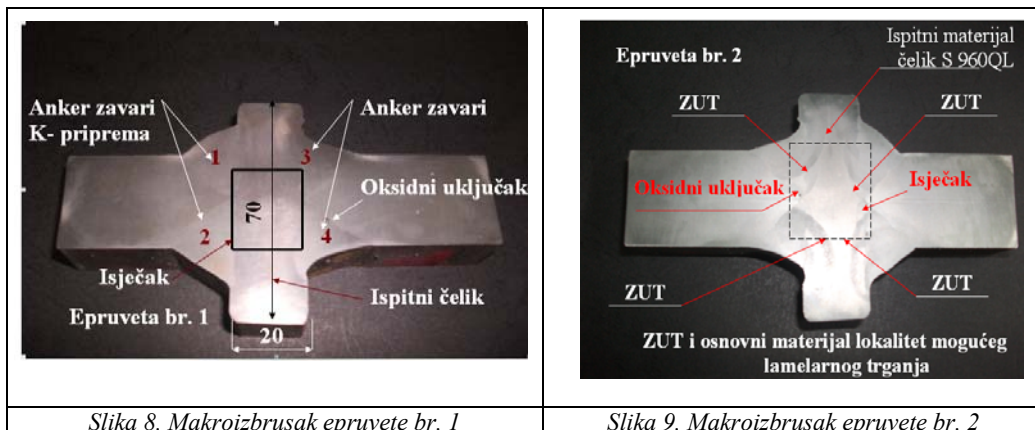
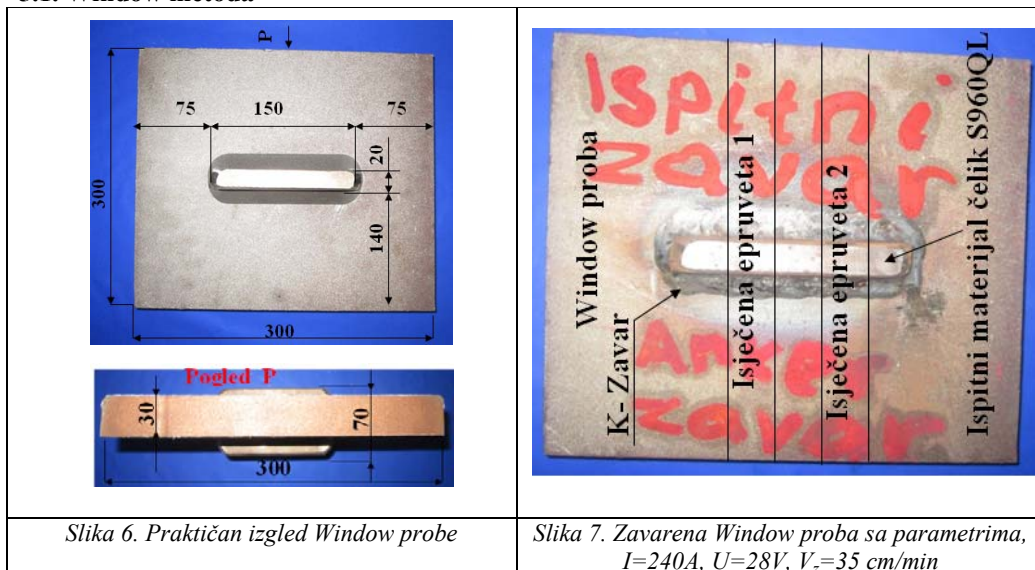
4.2. Procjena na tople pukotine

$$H.C.S. = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} \quad (3)$$

Uvrštavanjem kemijskog sastava iz tablice 1, u orijentacijsku formulu za procjenu sklonosti čelika toplim pukotinama, dobivamo vrijednost $H.C.S = 0.843$, što je ispod kritične granice za čelike visoke čvrstoće. Računska procjena pokazuje da čelik nije osjetljiv na pojavu toplih pukotina, jer je izračunati parametar pukotine $H.C.S. = 0.843 < 2$

5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

5.1. Window metoda



Eksperiment je proveden sa dvije metode, Window metoda za procjenu sklonosti čelika na pojavu lamelnog trganja i Vareststraint metoda za procjenu sklonosti čelika na pojavu toplih pukotina. Zavarivanje proba izvedeno je postupkom MAG (EN 135) uz uporabu zaštitnog plina Ar + CO₂ (EN 439) i dodatnog materijala žica tipa BÖHLER X90- IG, Union X96 (EN 12534). Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je u tablici 2.

Window proba je pripremljena prema dimenzijama na slike 3 i 6, a zavarena je prema slici 7. Ispitni i anker zavar zavaren je istim parametrima zavarivanja, slika 7. Prvo je zavaren anker zavar, a poslije ispitni zavar. Zavarivanje je izvedeno poluautomatski u više prolaza, pri čemu se vodilo računa o unosu topline. Nakon zavarivanja iz zavarene ploče isječena su dva segmenta prema slici 7, koja su poslužila za izradu epruveta za metalografsku analizu. Ispitne epruvete su brušene, zatim polirane i nagrižene odgovarajućim sredstvom (3 % HNO₃), slika 8 i 9 . Makroizbrusci, slika 8 i 9 poslužili su za detektiranje mogući lamelnih pukotina po

presjeku ispitnog čelika. Na presjecima makroizbrusaka nisu uočeni tragovi lamelarnih pukotina, niti u jednom kritičnom području, kao što se može vidjeti na slikama 8 i 9.

Na presjecima makroizbrusaka slike 8 i 9 nisu uočeni tragovi lamelarnih pukotina, ni u području ZUT-a, niti u osnovnom materijalu ispitnog čelika S960QL. Određeni nedostaci se mogu vidjeti na makroizbruscima, a radi se o oksidnim uključcima, greškama koje su uzrokovane od strane zavarivača.

Iz makroizbruska epruvete br.1, slika 8, izrezan je manji segment dimenzija 40x40 mm. Segment je isječen da bi se mogao uvećati, sa ciljem da bi se interesantna područja ZUT-a i osnovnog materijala bolje vidjela i omogućila bolja detekcija mogućih pukotina. Na uvećanom isječku slika 10, označena su četiri područja (1, 2) - osnovni materijal, (3, 4) – zona utjecaja topline. Područja ZUT-a i osnovnog materijala su bez tragova lamelarnih pukotina, što se jasno vidi na makroizbrusku, slika10. Jasno se vidi i oksidni uljučak, greška uzrokovana od strane zavarivača.



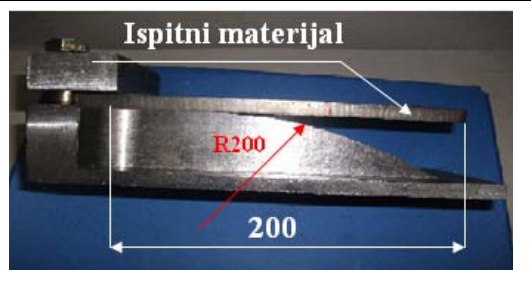
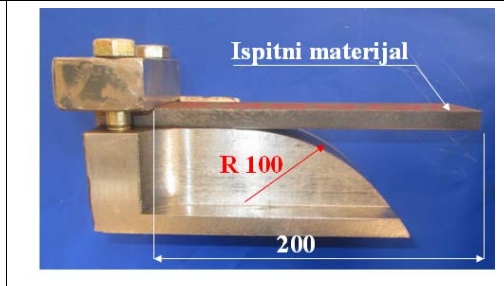


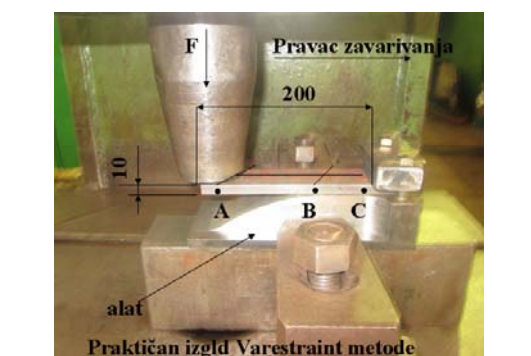

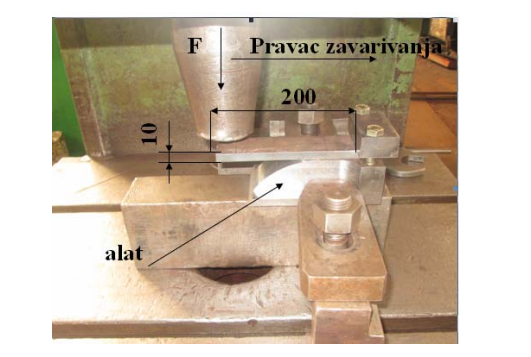
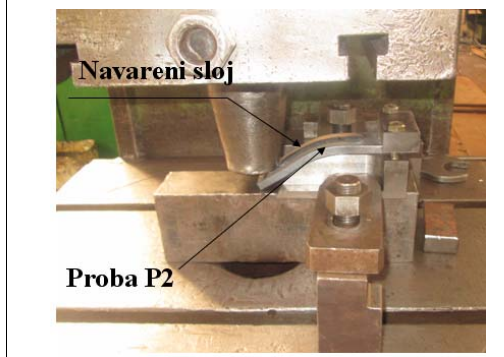
1 i 2, ispitni čelik S960QL
3 i 4 zona utjecaja topline,

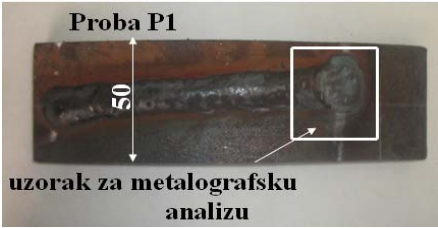




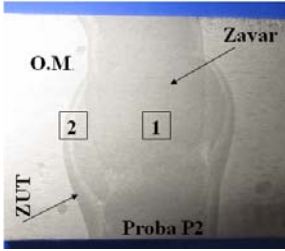
Slika 10. Isječak iz epruvete br.1

Tabela 2. Kemijski sastav dodatnog materijala [15]

Tip žice	Kemijski sastav dodatnog materijala, %					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
BOHLERx90-IG Union X96	0,12	0,80	1,90	2,35	0,45	0,55

5.2. VarestRAINT metoda

	
	
<p>Slika 11. Prakičan izgled VarestRAINT metode sa radijusom zakrivljenja R200 mm</p>	<p>Slika 12. Prakičan izgled VarestRAINT metode sa radijusom zakrivljenja R100 mm</p>
	
<p>Slika 13. Montirana proba P1 na presi za savijanje</p>	<p>Slika 14. Navarena i ispitana proba P1 stupanja deformacije 2,5%</p>
	
<p>Slika 15. Montirana proba P2 na presi zasavijanje</p>	<p>Slika 16. Navarena i ispitana proba P2, stupanj defomacije 5%</p>

 <p>Proba P1 50 uzorak za metalografsku analizu</p>	 <p>Proba P1</p>
<p>Slika 17. Navarena proba P1, parametri navarivanja $I=245A$, $U=28V$, $V_z=35\text{ cm/min}$</p>	<p>Slika 18. Isječak iz probe P1, Slika 19</p>
 <p>O.M Zavar 2 1 ZUT Proba P1</p>	
<p>Slika 19. Makroizbrusak isječka probe P1 (nagrizanje 3% HNO_3)</p>	
 <p>Proba P2 50 uzorak za metalografsku analizu</p>	 <p>Proba P2</p>
<p>Slika 20. Navarena proba P2, parametri navarivanja $I=245A$, $U=28V$, $V_z=35\text{ cm/min}$</p>	<p>Slika 21. Isječak iz probe P2, Slika 24</p>
 <p>O.M Zavar 2 1 ZUT Proba P2</p>	
<p>Slika 22. Makroizbrusak isječka probe P2 (nagrizanje 3% HNO_3)</p>	

Napravljene su dvije Varestraint probe. Jedna proba sa radijusem savijanja ispitne epruvete $R=200\text{ mm}$, slika 11 i $R=100\text{ mm}$, slika 12. Ispitne epruvete od čelika S960QL dimenzija $10 \times 50 \times 200\text{ mm}$, postavljene su u posebno pripremljen alat i stegnute vijcima, slike (11 i 12). Tako pripremljene probe postavljene su na presu za savijanje, slike (13 i 15). Po sredini ispitnih epruveta P_1 i P_2 od točke A do točke B, slike (13 i 15) izvedeno je navarivanje jednog sloja navara, sa definiranim parametrima zavarivanja. U trenutku kada je zavarivač došao do točke B, radnik na presi određenom silom F djeluje naprobu i savija je po konturi alata, dok zavarivač nastavlja navarivanje do točke C, slika 13. Stupanj deformacija vanjskih slojeva navara na probi P_1 iznosio je $\varepsilon = 2.5\%$, a na probi P_2 , $\varepsilon = 5\%$, slike (14 i 16). Iz navarenih

proba, slike (17 i 20) izrezani su segmenti dimenzija 40x40 mm, slike (18 i 21), koji su poslužili za metalografsku analizu. Isječeni segmenti slike (18 i 21) su brušeni i polirani, a zatim nagriženi posebnim sredstvom (3% HNO₃). Dobiveni makroizbrusci prikazani su na slikama (19 i 22). Na makroizbruscima se točno vidi područje ZUT-a, zavara i ispitnog materijala. Na tim područjima nisu primijećeni diskontinuiteti tipa toplih pukotina. Ispitivanje Vareststraint metodom provedeno je u poduzeću TMiH "Brastvo" u Novom Travniku. Makroskopska analiza navarenih epruveta napravljena je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala u poduzeću "Brastvo" Novi Travnik.

5.3. Analiza rezultata

Procjena sklonosti čelika visoke čvrstoće S 960QL na pojavu toplih pukotina i lamelarnog pucanja provedena je eksperimentalno i primjenom odgovarajućih matematičkih modela koji se koriste u tu svrhu. Izračunate vrijednosti parametra pukotine za lamelarno pucanje $P = 0.382$ i parametra toplih pukotina $H.C.S. = 0.843$, pokazuju da čelik nema sklonosti prema ovim vrstama diskontinuiteta. Da čelik nema sklonosti prema ovim greškama potvrđeno je i eksperimentalnim ispitivanjem. Za procjenu na lamelarno pucanje korištena je Window metoda, koja se preporučuje za takav vid istraživanja od većine istraživača. Na makroizbruscima, slike 8 i 9 nisu primijećeni tragovi lamelarnih pukotina na lokacijama, gdje se očekuju, a to je područje ZUT-a sa tendencijom širenja prema ispitnom materijalu. Procjena sklonosti čelika na tople pukotine provedena je Vareststraint metodom na dvije probe. Jedna proba je deformirana nakon zavarivanja sa stupnjem deformacije $\varepsilon = 2.5 \%$, a druga sa $\varepsilon = 5 \%$, slike (14 i 16). Navarene probe, slike (17 i 20), su poslužile kao epruvete iz kojih su izrezani segmenti koji su pripremljeni za metalografska ispitivanja, slike (18 i 21). Segmenti su brušeni, polirani i nagriženi sredstvom tipa (3% HNO₃). Tako dobiveni makroizbrusci slike (19 i 22) poslužili su za otkrivanje toplih pukotina u karakterističnim područjima kao što je osnovni materijal, zavar i ZUT. Na pripremljenim makroizbruscima nisu uočeni tragovi toplih pukotina niti u jednom kritičnom području.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedene matematičke i eksperimentalne analize zavarljivosti čelika S 960QL, s aspekta osjetljivosti na pojavu toplih i lamelarnih pukotina može se dati slijedeći zaključak:

- Korištenje matematičkih modela daje orjetacijsku procjenu sklonosti čelika na pojavu toplih i lamelarnih pukotina.
- Eksperimentalna procjena uz korištenje određenih metoda daje najsigurnije rezultate, koji se mogu smatrati točnim.
- Eksperimentalno je utvrđeno da čelik S 960QL nije sklon toplim i lamelarnim pukotinama što je također potvrdila i matematička procjena.

7. LITERATURA

- [1] Semjan V: Teorija zavarljivosti čelika, Energoinvest institut za zavarivanje, Sarajevo, 1989.
- [2] Kristallizacionye treščiny v svarnyh švah i pričiny ih obrazovanija, "Informacionnye materialy", SEW vypusk 2, Kiev 1987.
- [3] Hrivnjak I. Zavarljivost čelika, IRO "Građevinska knjiga" Beograd, 1982.
- [4] Sindo K., Welding metallurgy, second edition. U.S A. 2002.
- [5] Orešković V., Ispitivanje sklonosti Inconela 600 toplim pukotinama Vareststraint testom, Međunarodno savjetovanje "Nuklearna oprema- Zavarivanje i osiguranje kvaliteta" Sarajevo 1987.
- [6] Garašić I., Ćorić A., Kožuh Z., Samardžić I., Occurrence of cold crackes in welding of high-strength S960QL steel, Technical Gazette 17, 2010.
- [7] Katalog;, Union X 96 - GMAW solid wire.

