

ZAVARLJIVOST MIKROLEGIRANIH POBOLJŠANIH ČELIKA RABLJENIH U BRODOGRADNJI

Weldability of microalloyed quenched and tempered steels as used in shipbuilding

UDK 621.791:669.14
Original scientific paper
Izvorni znanstveni članak

Sažetak

U ovom radu su izneseni rezultati istraživanja provedenih na poboljšanom mikrolegiranom čeliku N-A-XTRA 70. Zavarivanje je izvedeno MAG postupkom zavarivanja, uz različite unose topline. Žarenje radi popuštanja zaostalih naprezanja izvedeno je pri 450, 550 i 650°C. Analiziran je utjecaj unesene topline za vrijeme i nakon zavarivanja na mehanička svojstva zavarenih spojeva.

Summary

This paper deals with the results of research conducted on quenched and tempered microalloyed steel. The welding process applied the MAG procedure with various heat inputs. In order to relieve the residual stresses, the annealing was done at 450, 550 and 650°C. The influence of heat input and stress relieving heat treatment has been researched by testing mechanical properties.

1. Uvod

Introduction

Prije otprilike 45 godina u svijetu, a nešto kasnije i kod nas, počela je intenzivnija primjena mikrolegiranih čelika.

Povišeno naprezanje tečenja ovih čelika, omogućavalo je izradu lakših konstrukcija, tako da su se

ovi čelici upotrebljavati za izradu: mostova, građevinskih strojeva, cjevovoda za hidrocentrale, dvorana u građevinarstvu, tlačnih spremnika, auto i vagon cisterni. Naročito veliku primjenu ovi čelici imali su u brodogradnji. U eksploataciji ovih konstrukcija najčešće se javljaju pogreške tipa pukotina [1, 2]. Najveći broj pukotina otkriven je na mjestima najvećih naprezanja, a najčešće u zoni utjecaja topline zavarenih spojeva.

Popravci se izvode izbrusivanjem, ukoliko dubina pukotine ne prelazi debljinu dodatka za koroziju. Ukoliko je pukotina dublja, popravak se obavlja vađenjem pukotine i navarivanjem. Bilo je i objekata koji su i trajno isključeni iz upotrebe zbog ozbiljnih oštećenja, od kojih su neka išla kroz cijelu debljinu materijala.

Raščlamba rezultata istraživanja ukazuje da je teško jednoznačno definirati uzroke oštećenja. Označena su globalna područja i pojave unutar njih kao potencijalni uzročnici oštećenja, s tim da ni jedno od tih područja, odnosno pojava unutar njih, nije isključivi uzročnik oštećenja, već se međusobno naslojavaju.

Ta područja i pojave su [3]:

- projekti i konstrukcije
- tehnologija i način izrade
- kontrola pri izgradnji
- uvjeti i način eksploatacije
- tlačna proba.

1. 1. Dobivanje mikrolegiranih čelika

Production of microalloyed steels

U literaturi se mikrolegirani čelici još nazivaju čelici povišene čvrstoće ili sitnozrnati čelici. To su slitine Fe-C s Al, Nb, V, Ti, Mo, Ni, Zr, Cr i drugim elementima u malim količinama. Radi zavarivanja ugljik je rijetko zastupljen s

*Dr. sc. Nedjeljko Mišina, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, R. Boškovića b.b., 21000 Split

**Dr. sc. Marijo Oršulić, Visoka pomorska škola Sveučilišta u Splitu, Zrinsko-frankopanska 38, 21000 Split

***Dr. sc. Ivan Polajnar, Fakultet za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

više od 0,26% [4], s tim da se u posljednje vrijeme teži izradi čelika s manje od 0,1% [5].

Moderna tehnologija izrade čelika uključuje u proces izrade posebnu metalurgiju i kontinuirano lijevanje plosnatih i okruglih profila što manje debljine. Elektrolučna peć je u načelu samo agregat za taljenje, a sve dodatne operacije (korektura kemijskog sastava, dezoksidacija, modifikacija uključaka, smanjivanje udjela plinova u čeliku), koje bitno utječu na kvalitetu čelika izvode se u loncu u vakuumskoj komori uz propuhivanje čelika argonom.

Na taj način, moguće je smanjiti koncentraciju vodika i kisika za više od 50%, a sumpora i ispod 0,003% [6]. Osim toga, dodavanjem modifikatora uključaka dolazi do promjene oblika i rasporeda sulfida, silikata i oksida u okrugli oblik. Takvi uključci se toplim valjanjem ne deformiraju u pravcu valjanja, pa se tako odstranjuje utjecaj nemetalnih uključaka na izotropiju mehaničkih svojstava kod limova. Sve to dovodi do poboljšanja zavarljivosti i žilavosti pri niskim temperaturama.

Ovisno o postignutom napreznju tečenja razlikuju se tri grupe ovih čelika:

- mikrolegirani čelici s napreznjem tečenja do 550 MPa, koje se postiže nakon valjanja i normalizacije,
- mikrolegirani čelici s napreznjem tečenja do 1500 MPa, koje se postiže nakon poboljšanja,
- mikrolegirani čelici pod nazivom ultračvrsti čelici s napreznjem tečenja iznad 1500 MPa, koje se postiže termomehaničkim kontroliranim valjanjem.

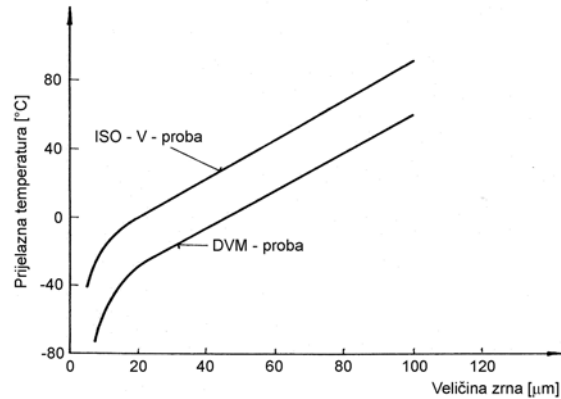
Plastična deformacija čelika temelji se na procesima koji se odvijaju preko gibanja dislokacija kao diskontinuirani djelomični koraci klizanja po kristalografski povoljnim ravninama. Prema tome, presudan utjecaj na mehaničku otpornost metala imaju dislokacije. Kretanje dislokacija treba otežati, ali da ipak bude moguće kretanje mnogih dislokacija na "duge pruge" da se održi dovoljna istezljivost [7]. Postoji više različitih mehanizama koji mogu biti uključeni u ometanju kretanja dislokacija. Najdjelotvorniji su usitnjenje zrna i precipitiranje.

Očvršnuće usitnjenjem zrna zasniva se na činjenici da sitnija kristalna struktura ima veći broj granica zrna. Utjecaj granica zrna na gibanje dislokacija očituje se u povišenju napreznja koje treba narinuti izvana da se izazove plastična deformacija. Brojnim istraživanjima dokazano je da napreznje tečenja ovisi o drugom korijenu recipročne vrijednosti veličine zrna, prema Hall-Petchovoj jednadžbi [7]:

$$Re = R_0 + Ke d^{-1/2} \quad (1)$$

- gdje je: Re - napreznje tečenja,
 R_0 - napreznje pri kojem bi popustio materijal s normalnom veličinom zrna,
 Ke - faktor zavisao o vrsti materijala,
 d - srednji promjer zrna

Veličina zrna utječe i na čvrstoću materijala, ali je taj utjecaj manji nego na napreznje tečenja, pa zato sa sitnoćom zrna raste Re/Rm . Mehanizam očvršnuća putem usitnjenja zrna povećava istodobno čvrstoću i žilavost, odnosno snizuje prijelaznu temperaturu [7, 8], slika 1.



Slika 1. Utjecaj veličine zrna na prijelaznu temperaturu [7]

Fig. 1. Influence of dimension of the grain on transient temperature [7]

U praksi se teži sitnom austenitnom zrnju, jer ono predodređuje veličinu feritnog zrna. Reguliranje veličine austenitnih zrna je moguće precipitacijom finih čestica u austenitnoj strukturi, čime se sprječava porast zrna. U tom smislu djeluje aluminij preko Al-nitrida i V, Nb i Ti preko svojih karbida, nitrida i karbonitrida. Daljnja je mogućnost da se austenitno zrno usitni većim stupnjem deformacije i nižom temperaturom završnog valjanja. Konačno, postoji mogućnost da se spriječi rekristalizacija austenita pri valjanju prisutnošću TiN po granicama zrna.

Precipitacijsko povećanje napreznja tečenja zavisi o metalno-fizikalnoj interakciji dislokacija i precipitata, koja se može opisati dvama procesima. To su proces obilaženja (Orovanov mehanizam) i odrezni proces. Pri tome je bitna veličina, količina i tvrdoća precipitata. Ako su čestice tvrde, dislokacija ne može prodrijeti u njih (odrez), nego se dislokacija svija između čestica i obilazi ih. Za napreznje potrebno za obilazak čestica vrijedi Orovanova relacija [7]:

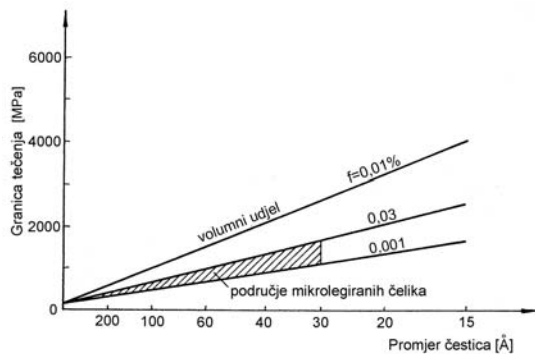
$$Re = 3 G b / D \quad (2)$$

Gdje je: G – modul smika čestica,

b – Burgersov vektor,

D – razmak među precipitatima

Najdjelotvornije su čestice precipitata veličine 30 – 50 nm. Eventualna njihova koagulacija u precipitate većih dimenzija djelovat će manje intenzivno na povišenje Re . Uz veličinu i razmak između precipitata ulogu igra i volumenski udjel čestica, slika 2. Najjače je očvršnuće onda kada su veličine čestica i razmak među njima upravo takvi da ne nastupa odrez.



Slika 2. Povišenje napreznja tečenja zbog mehanizma obilaska čestica različitih promjera i volumenskog udjela [7]

Fig. 2. Increasing of yield stress due to mechanisms of circulation of particles of different diameter and volume portion [7]

Povoljno djelovanje u smislu precipitiranja dovoljno čvrstih, dovoljno sitnih i dovoljno dispergiranih čestica (precipitata) imaju posebno elementi: Ti, V i Nb, koji s ugljikom i dušikom tvore svoje karbide, nitride i karbonitride.

1. 2. Zavarljivost mikrolegiranih čelika Weldability of microalloyed steels

Pod zavarljivošću podrazumijeva se dobivanje homogenih zavarenih spojeva prihvatljivih mehaničkih i ostalih svojstava primjenom uobičajene ili specijalne tehnologije zavarivanja. Upravo je zavarljivost mikrolegiranih čelika osnovni problem pri njihovoj uporabi. Problemu zavarljivosti može se pristupiti s raznih stajališta: metalurškog, konstrukcijskog i izvedbenog. Metalurška zavarljivost čelika se često izražava ekvivalentom ugljika koji se dobije izračunavanjem po određenim formulama, pri čemu svi kemijski elementi koji čine kemijski sastav čelika u različitim stupnjevima utječu na njegov iznos [9, 10].

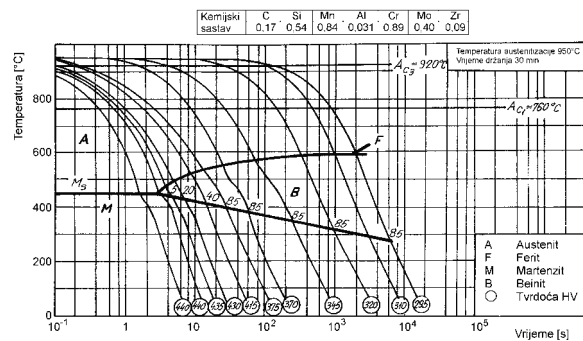
Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod mikrolegiranih čelika je potrebno dodatnim ispitivanjima donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti, jer uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i sadržaja vodika u zavaru, pokazuju različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama. Zato je kod mikrolegiranih čelika potrebno ispitati, između ostalih, i sljedeće utjecajne čimbenike: sklonost nastajanju toplih pukotina, sklonost nastajanju hladnih pukotina, osjetljivost zavora i zone utjecaja topline prema krhkom lomu, lamelarno trganje i sklonost nastajanju pukotina od žarenja za redukciju zaostalih napreznja.

Unesena toplina pri zavarivanju je jedan od važnijih čimbenika koji djeluju na svojstva zavarenog spoja. Vrlo često, proizvođači čelika, između ostalog, daju preporuke za optimalnu količinu topline koja se unosi pri zavarivanju određenog čelika, na osnovi čega se mogu odrediti parametri zavarivanja (I , U i v_z), ovisno o postupku zavarivanja iz relacije:

$$E = I U \eta / v_z \quad (3)$$

gdje je: E – unesena toplina, J/mm,
 I – jakost struje zavarivanja, A,
 U – napon zavarivanja, V,
 v_z – brzina zavarivanja, mm/s,
 η – koeficijent stvarno unesene topline koji ovisi o postupku zavarivanja.

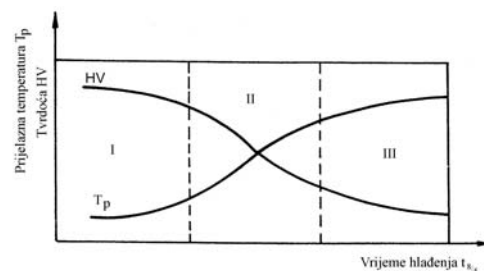
Na strukturu, a time i na svojstva zone utjecaja topline i metala zavora, presudan utjecaj ima vrijeme hlađenja između temperatura 800 i 500 °C ($t_{8/5}$). U tom se temperaturnom intervalu odvija većina pretvorbi u čeliku, koje bitno utječu na njegova svojstva. U literaturi se često koriste TTT – dijagrami iz kojih se na osnovi poznate vrijednosti $t_{8/5}$ zaključuje o nastaloj strukturi i tvrdoći pri hlađenju zavarenog spoja, slika 3. Pri tome treba naglasiti da temperatura austenitizacije u zavarenom spoju nije konstantna kao na TTT – dijagramima, pa dobivene vrijednosti treba uzeti kao orijentacijske.



Slika 3. TTT – dijagram mikrolegiranog čelika N-A-XTRA 70 [11]

Fig. 3. TTT – diagram of the microalloyed steel N-A-XTRA 70 [11]

Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ za mikrolegirane čelike iznosi 10 – 30 s, a za čelik N-A-XTRA 70 preporuča se 13 – 18 s [12]. Ono se ograničava radi toga da bi se spriječio porast veličine zrna u zoni utjecaja topline (ZUT) i zavaru i time smanjila žilavost s jedne strane te, s druge strane, onemogućilo nastajanje zakaljene strukture u zavarenom spoju, slika 4.



Slika 4. Utjecaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na tvrdoću i prijelaznu temperaturu [12]

Fig 4. The effect of cooling time $t_{8/5}$ on hardness and transition temperature [12]

Kod zavarivanja mikrolegiranih čelika obično se odabire vrijeme hlađenja koje odgovara području II na slici 4. Time se uklanja opasnost nastajanja hladnih pukotina (područje I) i dobivanje niskih žilavosti (područje III).

2. Eksperimentalni rad

Experimental work

2. 1. Osnovni i dodatni materijal

Parent and filler material

Pokusi su izvedeni na mikrolegiranom čeliku N-A-XTRA 70 debljine 15 mm. Ovaj čelik je proizvod Thyssenovog koncerna i predstavlja u Europi najviše korišteni konstrukcijski čelik poboljšanog tipa. Rezultat ispitivanja kemijskog sastava čelika N-A-XTRA 70 je: C-0,23%; Si- 0,67%; Mn-0,90%; Cr-0,90%; Mo-0,23%; Al-0,043%; Zr-0,1%; P-0,013% i S-0,013%.

Mehanička svojstva čelika N-A-XTRA 70 su: Re=760 MPa, Rm=828 MPa, A₅=16,5% i KV=80,3 J na -20 °C.

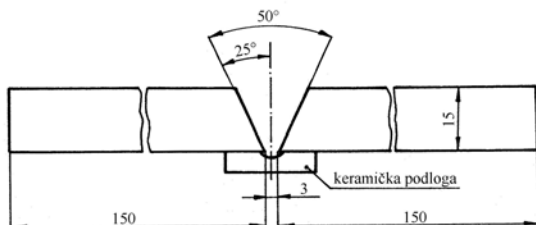
Kao dodatni materijal upotrebljena je praškom punjena žica Fluxofilcord 42 promjera 1,2 mm, proizvod Rosarca iz Genove. Kemijski sastav žice je: C-0,1%; Si-0,6%; Mn-(1,3-1,8)%; Mo-(0,25-0,5); Cr-0,4%; Ni-(1,25-2,5)%; P-0,03% i S-0,03%.

Mehanička svojstva žice su: Re=713 MPa, Rm=756 MPa, A₅=19% i KV=34,4 J na -60 °C.

2. 2. Priprema i zavarivanje ploča

Preparation and welding of plates

Iz table lima plinski je izrezano 6 ploča dimenzija 650x160x15 mm. Kako bi se izbjegao utjecaj plinskog rezanja, blanjanjem je kod svih ploča skinut sloj debljine 10 mm na strani zavarivanja, a nakon toga izvedeno skošenje od 25°, slika 5.



Slika 5. Priprema spoja za zavarivanje

Fig. 5. Preparing a joint for welding

Zavarivanje svih ploča izvedeno je automatski MAG postupkom zavarivanja praškom punjenom žicom Fluxofilcord 42 promjera 1,2 mm. Predviđeno je da unosi topline budu na tri razine, a prema njima su određeni i parametri zavarivanja.

Tablica 1. Parametri zavarivanja

Table 1. Welding parameters

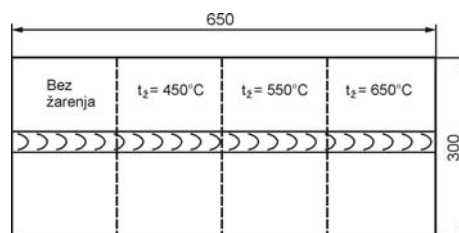
Srednja unesena energija kJ/cm	Struja zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Brzina zavarivanja [mm/s]	Broj slojeva
9,51	140	21	2,47	8
13,64	230	24	3,24	5
22,81	285	29	2,90	3

Protok zaštitnog plina CO₂ je za sve pokuse bio jednak i iznosio je 15 l/min. Zavarivanje ploča se izvodilo višeslojno. Prije polaganja sljedećeg sloja ploče su se hladile na zraku na početnu temperaturu, što je čest slučaj kod zavarivanja dugih zavara.

2. 3. Toplinska obrada zavarenih ploča

Heat treatment of welded plates

Prije toplinske obrade zavarene ploče su izrezane okomito na zavar na četiri dijela, blanjanjem uz intenzivno hlađenje. Tako dobiveni dijelovi ploča dimenzija 150x300x15 mm žarili su se u trajanju od 4 sata radi redukcije zaostalih naprezanja. Žarenje je izvedeno pri temperaturama 450, 550 i 650 °C, a jedan dio svake ploče nije se žario, slika 6. U literaturi nema podataka kakav je utjecaj toplinske obrade radi redukcije zaostalih naprezanja na osnovni materijal koji nije bio izložen unesenoj toplini prilikom zavarivanja. Zbog toga je provedena toplinska obrada i na osnovnom materijalu čelika N-A-XTRA 70, pod istim uvjetima kao i kod zavarenih spojeva.



Slika 6. Plan žarenja zavarenih spojeva

Fig. 6. The annealing scheme for welded plates

2. 4. Izrada epruveta za ispitivanje

Making specimens for testing

Iz svake od ukupno 16 ploča učinjene su po tri epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće i istezljivosti prema Chevenardovu sustavu, po šest epruveta za ispitivanje radnje loma prema Charpyju, od kojih tri sa zarezom V2 u sredini zavara, a tri sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline, i jedna epruveta za ispitivanje tvrdoće i analizu mikrostrukture. Epruvete su izrađene obradom skidanja strugotine, kako bi se unijela što manja količina topline.

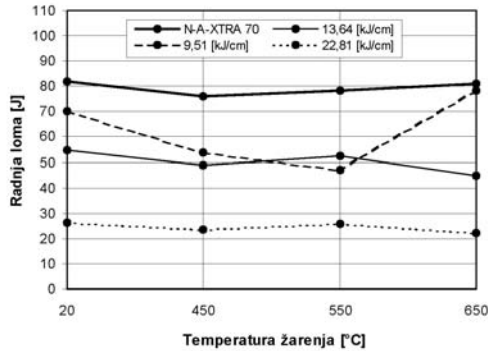
3. Rezultati ispitivanja

Results of testing

3. 1. Rezultati ispitivanja radnje loma

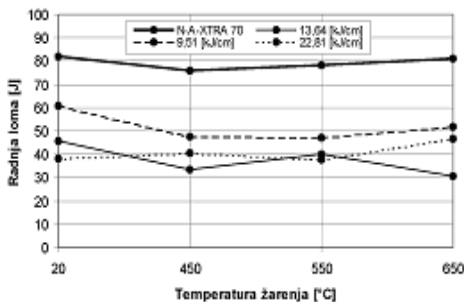
Results of testing of impact toughness

Radnja loma po Charpyju je ispitana pri temperaturi - 20 °C. Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 7 i 8.



Slika 7. Utjecaj srednje unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na radnju loma zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70, sa zarezom V2 u ZUT-u

Fig. 7. The effect of the average heat input in welding and the annealing temperature on the impact toughness of a welded steel joint N-A-XTRA 70 with notch V2 in the HAZ



Slika 8. Utjecaj srednje unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na radnju loma zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70, sa zarezom V2 u sredini zavara

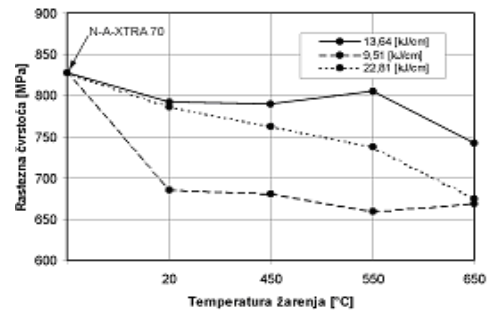
Fig. 8. The effect of the average heat input in welding and the annealing temperature on the impact toughness of a welded steel joint N-A-XTRA 70 with notch V2 in the weld centre

3.2. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i istezljivosti

Results of testing of tensile strength and extension

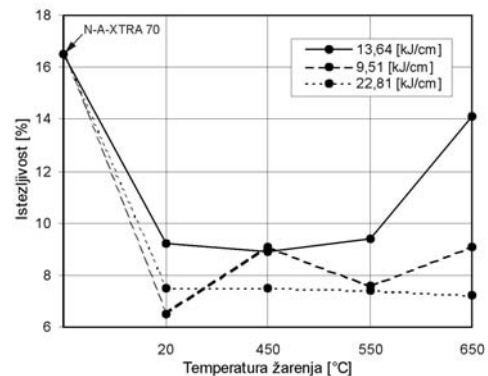
Rastezna čvrstoća i istezljivost su ispitani prema Chevenardovu sustavu na Amslerovoj kidalici. Snimljeni su dijagrami razvlačenja (P-Δ). Na osnovi dijagrama izračunata je rastezna čvrstoća i istezljivost.

Kod zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70 na snimljenim dijagramima nije izraženo naprezanje tečenja, pa se nije moglo ni izračunati. Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 9 i 10.



Slika 9. Utjecaj srednje unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na rasteznu čvrstoću zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70

Fig. 9. The effect of the average heat input in welding and the annealing temperature on the tensile strength of a welded steel joint N-A-XTRA 70



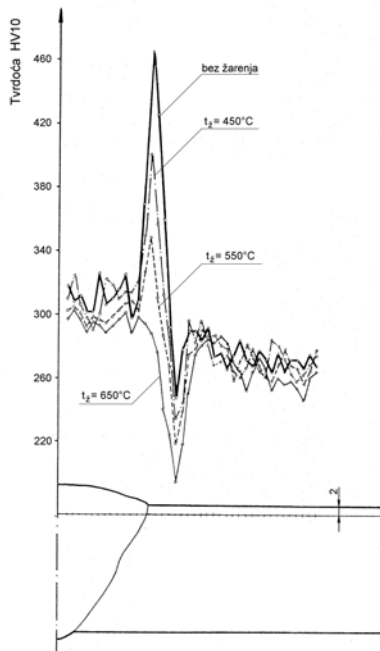
Slika 10. Utjecaj srednje unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na istezljivost zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70

Fig. 10. The effect of the average heat input in welding and the annealing temperature on the extension of a welded steel joint N-A-XTRA 70

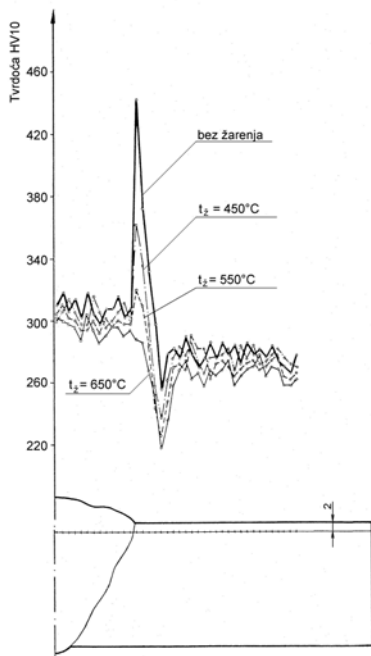
3. 3. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Results of hardness testing

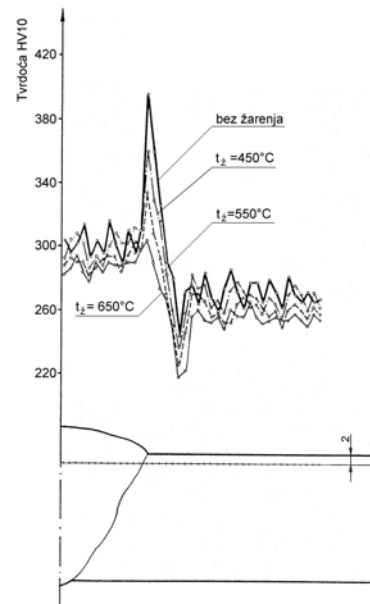
Tvrdoća je ispitana Vickersovom metodom s opterećenjem 10 x 9,81 N (HV10) poprijeko na zavareni spoj na razmacima od 0,5 mm. Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 11, 12 i 13.



Slika 11. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika N-A-XTRA 70, zavarenog s unosom topline od 9,51 kJ/cm i žarenog pri različitim temperaturama
 Fig. 11. Change of hardness by the intersection of welded joint of steel N-A-XTRA 70, welded with heat input of 9,51 kJ/cm and annealed at different temperatures



Slika 12. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika N-A-XTRA 70, zavarenog s unosom topline od 13,64 kJ/cm i žarenog pri različitim temperaturama
 Fig. 12. Change of hardness by the intersection of welded joint of steel N-A-XTRA 70, welded with heat input of 13,64 kJ/cm and annealed at different temperatures



Slika 13. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika N-A-XTRA 70, zavarenog s unosom topline od 22,81 kJ/cm i žarenog pri različitim temperaturama
 Fig. 13. Change of hardness by the intersection of welded joint of steel N-A-XTRA 70, welded with heat input of 22,81 kJ/cm and annealed at different temperatures

4. Zaključak

Conclusion

Na osnovi provedenih istraživanja i spoznaja o pojavama koje nastaju u mikrolegiranim čelicima prilikom zavarivanja i žarenja radi redukcije zaostalih naprezanja, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1. Istraživanja provedena na osnovnom materijalu mikrolegiranog poboljšanog čelika N-A-XTRA 70 ukazuju da prilikom žarenja do temperature 650 °C, do koje se najčešće žari radi redukcije zaostalih naprezanja, ne dolazi do bitnih promjena tvrdoće i radnje loma. Tek zavarivanjem ovog čelika javljaju se neke promjene i to u zavaru i ZUT-u. Naime, pri hlađenju zavara i ZUT-a nakon zavarivanja ne pojavljuju se jednaki procesi kao pri hlađenju uz valjanje prilikom dobivanja čelika. Kod hlađenja zavarenog spoja izostaje kočenje rekristalizacije austenita putem tople deformacije, pa zbog topline unesene zavarivanjem dolazi do rekristalizacije i do jačeg pogrubljenja zrna, što utječe na smanjenje mehaničkih svojstava.

2. Unesena toplina pri zavarivanju, odnosno parametri zavarivanja, imaju važan utjecaj na svojstva zavarenih spojeva. Veća unesena toplina naročito je utjecala na smanjenje radnje loma ZUT-a, koja se žarenjem za redukciju zaostalih naprezanja do temperature 650 °C nije poboljšala. Najveća tvrdoća u ZUT-u dobiva se pri malom unosu topline prilikom zavarivanja. Povećanjem tvrdoće nije došlo i do povećanja čvrstoće zavarenih spojeva, kao što to tvrde neki autori [11, 14, 15].

Čvrstoća zavarenih spojeva dobivenih zavarivanjem s malim unosom topline čak je za oko 13% niža od čvrstoće dobivene zavarivanjem s unosom topline od 13,64 kJ/cm. Razlog smanjenja rastezne čvrstoće je pad istezljivosti zavarenog spoja zbog nastanka tvrde martenzitne strukture u ZUT-u.

3. Žarenjem radi redukcije zaostalih naprezanja uspješno se smanjuje tvrdoća ZUT-a zbog popuštanja nastalog martenzita. Međutim, žarenjem zavarenih spojeva pri temperaturama do 650 °C nije moguće povećati nedopustivo niske iznose radnje loma, odnosno rastezne čvrstoće, koji su dobiveni neodgovarajućim unosom topline prilikom zavarivanja. Na osnovi iznesenog može se zaključiti da pri zavarivanju mikrolegiranog poboljšanog čelika N-A-XTRA 70 treba izbjegavati male unose topline (9,51 kJ/cm) zbog niske rastezne čvrstoće zavarenog spoja, kao i velike unose topline (22,81 kJ/cm) zbog niske radnje loma ZUT-a. Najbolji rezultati mehaničkih svojstava zavarenih spojeva su dobiveni zavarivanjem s unosom topline od 13,64 kJ/cm. Žarenjem pri temperaturi od 550°C uspješno se smanjuje tvrdoća u ZUT-u, dok žarenje pri 650°C treba izbjegavati zbog smanjenja rastezne čvrstoće.

Literatura

References

- [1] Cantwell, J.E.: LPG Storage Vessel Cracking Experience, NACE, IC Corrosion, St Luis, Missouri, 1988.
- [2] Mc Henry, A. I., Read D. T., Shives T. R.: Failure Analysis of an Amin-absorber Pressure Vessel, Summer School "Perspectives and Development of Fracture Mechanics", Dubrovnik, 1987.
- [3] Jakšić, S., Šeparović, B., Vukičević, I.: Ispitivanje objekata u eksploataciji, Znanstveno stručni skup "Problemi primjene visokočvrstih čelika", Slavonski Brod, 1989., Zavarivanje 32 (1989), 5-6, 179-183.
- [4] Linnert, E. G.: Welding metallurgy carbon and alloy steels, American welding society, New York, 1997.
- [5] Lukačević, Z.: Projektiranje, proizvodnja i montaža proizvoda iz visokočvrstih čelika, Znanstveno-stručni skup "Problemi primjene visokočvrstih čelika", Slavonski Brod, 1989., Zavarivanje 32 (1989), 5-6, 161-171.
- [6] Gabrovšek, M.: Utjecaj metalurgije izrade čelika na tehnološka svojstva limova povišene čvrstoće, Znanstveno stručni skup "Problemi primjene visokočvrstih čelika", Slavonski Brod, 1989., Zavarivanje 32 (1989), 5-6, 133-140.
- [7] Strassburger, C.: Entwicklungen zur Festigkeitssteigerung der Stähle, Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1976.
- [8] Tanaka, T.: International Metals Reviews 4 (1981), 185-211.
- [9] Bradstreet, B. J.: Effect of Welding Conditions on Cooling Rate and Hardness in the Heat-Affected Zone, Welding Journal 48 (1969), 11, 499-504
- [10] Cottrell, C. L. M.: Hardness equivalent may lead to a more critical measure of weldability, Metal Construction 16 (1984), 12, 740-744.
- [11] Hochfeste wasservergütete Sonderbaustahle N-A-XTRA 70 und T-1, Thyssen, 1977.
- [12] Rak, I., Gliha V.: Zavarljivost konstrukcijskih čelika s povišenom čvrstoćom i žilavosti za složena opterećenja, Znanstveno stručni skup "Problemi primjene visokočvrstih čelika", Slavonski Brod, 1989., Zavarivanje 32 (1989), 5-6, 152-160.
- [13] Lukačević, Z.: Izbor optimalnog postupka zavarivanja visokočvrstih čelika, Zavarivanje 16 (1973), 5-6, 157-164
- [14] Bernard, G., Faure, F., Maltrepierre P.: Properties of Welds in Submerged Arc Welding, Welding of HSLA Structural Steels, Rome, Nov. 1976., ASM.
- [15] Rothwell, A. B., Mc Graht, J. T., Glover, A. G., Graville, B. A., Eatherly, G. C.: Heat Affected zone Toughness of Welded Joints in Microalloy Steels, CANMET Report 79-6, Jan. 1999., Ottawa.

Rukopis primljen: 23.5.2003.