

Živče Šarkočević¹, Miodrag Arsić², Marko Rakin³, Aleksandar Sedmak⁴

IZRADA ŠAVNIH CEVI OD ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE I ISPITIVANJE POKAZATELJA KVALITETA

FABRICATION OF HIGH STRENGTH SEAM WELDED STEEL TUBES AND QUALITY INDICATOR TESTING

Stručni rad / Professional paper

UDK /UDC: 621.774.2:669.15

621.791.05:669.15-462

Rad primljen / Paper received: 16.8.2008.

Adresa autora / Author's address:

¹) Visoka tehnička škola strukovnih studija, Zvečan-Kosovska Mitrovica, zivcesarkocevic@yahoo.com

²) Institut za ispitivanje materijala – IMS, Beograd

³) Tehnološko–metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu

⁴) Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Ključne reči

- spiralno zavarene cevi
- uzdužno zavarene cevi
- parametri zavarivanja
- ispitivanja šavnih cevi
- kvalitet zavarenih spojeva

Izvod

Izbor čelika, dimenzija i načina proizvodnje šavnih cevi je deo procesa konstruisanja, jer je u uskoj vezi sa funkcijom cevi kao konstrukcijske celine u određenim uslovima eksploatacije za predviđeni vek trajanja.

Kvalitet zavarenih spojeva u procesu proizvodnje šavnih cevi definiše se karakteristikama koje cevi moraju imati da bi zadovoljile određene zahteve, što se postiže izborom odgovarajućih postupaka i parametara zavarivanja, sprovođenjem programa kontrole svih tehnoloških operacija u njihovoj izradi i mehaničkim i tehnološkim ispitivanjima otpornosti i deformacije osnovnog materijala i zavarenih spojeva cevi.

U radu su prikazani rezultati istraživanja pokazatelja kvaliteta šavnih cevi izrađenih od čelika povišene čvrstoće X60 i J55, namenjenih za izradu cevi za naftovode, gasovode i bušotine. Spiralno zavarene cevi izrađuju se zavarivanjem pod praškom (EPP), a uzdužno zavarene, visokofrekventnim postupkom zavarivanja (VF).

UVOD

Čelici za izradu šavnih cevi treba da zadovolje određene zahteve čvrstoće, krutosti, tehnologije izrade, radnih uslova (kao što su temperatura i agresivnost sredine), i cene. Niskougljenični čelici, normirani DIN 1626, namenjeni za

Keywords

- spiral welded tubes
- longitudinal welded tubes
- welding parameters
- welded tubes testing
- quality of welded joints

Abstract

The selection of steel, the dimensions and methods of fabricating seam welded steel tubes are closely connected to the function of tube as a whole structure in specific working conditions, for a calculated service life.

The quality of welded joints in the fabrication process of seam welded tubes is defined by properties the tubes must possess in order to satisfy defined requirements, and can be achieved by choosing appropriate procedures and welding parameters, by following control programmes in all fabricating operations, and through mechanical and technology stress and strain tests of base metal and seam welded joints.

In the paper are described quality indicator research results of seam welded tubes made of high strength steels X60 and J55, dedicated for producing oil and gas pipelines and in oil wells. Spiral welded tubes are produced by submerged arc welding (SAW), and the longitudinal welded pipes by high frequency welding technique.

INTRODUCTION

Steels for seam welded tubes must satisfy certain requirements of stiffness, strength, manufacturing process, working conditions (temperature and environmental influence), and price. Low carbon steels, according to DIN 1626, for pro

izradu šavnih cevi za opštu primenu, imaju adekvatnu oznaku u JUS C.BO.500. Čelici povišene čvrstoće, namenjeni za izradu šavnih cevi za naftovode, gasovode i bušotine, normirani su standardima API Std 5LS i API 5Ct, /1/. Mehaničke karakteristike ovih čelika date su u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Mehaničke karakteristike prema API Std 5LS
Table 1. Mechanical properties, according to API Std 5LS.

| Vrsta čelika (Steel type) | R_{eH} (MPa) min. | R_m (MPa) min. |
|---------------------------|---------------------|------------------|
| A | 207 | 331 |
| B | 241 | 414 |
| X 42 | 290 | 414 |
| X 46 | 317 | 434 |
| X 52 | 359 | 455–492 |
| X 56 | 386 | 489–517 |
| X 60 | 414 | 517–537 |
| X 65 | 448 | 537–551 |
| X 70 | 483 | 565 |

Savremene tehnologije proizvodnje šavnih cevi omogućuju kontinuiranu proizvodnju cevi sa spiralnim i uzdužnim šavom, pri čemu je osnovna težnja da se ostvari brzina zavarivanja jednaka brzini formiranja cevi. Mašine za kontinuiranu proizvodnju spiralno zavarenih cevi uglavnom su konstruisane za automatsko zavarivanje pod praškom, a mašine za poluautomatsku i automatsku proizvodnju uzdužno zavarenih cevi za visokofrekventno kontaktno zavarivanje i indukcijom zavarivanje, /2/. Izbor parametara zavarivanja je značajan i za izradu sistema upravljanja kvalitetom, jer se njihovom promenom značajno menja kvalitet zavarenih spojeva.

PROCES ZAVARIVANJA CEVI POD PRAŠKOM

Posle poprečnog spajanja, kod nastavljanja trake novog kotura, traka prolazi kroz sistem valjaka za ravnjanje, a zatim dolazi do glavnih pogonskih valjaka. Za dobijanje trake konstantne širine, kao i zbog toga što krajevi toplo valjane trake mogu biti oštećeni ili sa greškama koje mogu prouzrokovati zavareni spoj lošeg kvaliteta, krajevi trake se obrezuju sa obe strane po 15 mm.

Za formiranje stranica žleba, sa obe strane trake postavljena su kopirna glodala za obaranje ivica pod uglom od 4–12 stepeni. Tako pripremljena traka dolazi u uređaj za oblikovanje trake u cev, i nadalje za zavarivanje. Elektroдна žica za zavarivanje se dovodi elektromotorima, koji su postavljeni za unutrašnje zavarivanje na zadnjem delu nosača gornje garniture rolni, a za spoljašnje zavarivanje na samom postolju na kojem je postavljena i glava za spoljašnje zavarivanje. Prašak za zavarivanje se dovodi na mesto zavarivanja pod pritiskom komprimovanog vazduha.

Izbor parametara zavarivanja zavisi od vrste i debljine osnovnog materijala. Osnovni parametri EPP postupka zavarivanja su: jačina i gustina struje zavarivanja, prečnik elektrodne žice, napon luka, brzina zavarivanja i nagib žice i radnog dela.

Na izvesnom rastojanju od glave za spoljašnje zavarivanje je uređaj za ultrazvučno kontrolisanje kvaliteta zavarenog spoja. Na izlazu postrojenja je uređaj za gasno rezanje cevi na zahtevanu dužinu, i prihvatno-silazni most koji je predaje na prvi transporter, kao gotovu cev.

Modern manufacturing technologies of seam welded tubes for universal applications, are designated JUS C.BO.500. High strength steels for producing seam welded tubes in oil and gas pipelines and in oil wells, are rated according to API Std 5LS and API 5Ct, /1/. Mechanical properties of these steels are given in tables 1 and 2.

Tabela 2. Mehaničke karakteristike prema API 5CT
Table 2. Mechanical properties according to API 5CT.

| Vrsta čelika (Steel type) | R_{eH} (MPa) min. | R_m (MPa) min. |
|---------------------------|---------------------|------------------|
| H-40 | 276–552 | 414 |
| J-55 | 379–552 | 517 |
| K-55 | 379–552 | 655 |
| N-80 | 552–758 | 689 |
| C-75 | 517–620 | 655 |
| L-80 | 552–655 | 655 |
| C-90 | 620–724 | 690 |
| C-95 | 655–758 | 724 |
| T-95 | 655–758 | 724 |
| P-105 | 724–931 | 827 |
| P-110 | 758–965 | 262 |
| Q-125 | 860–1035 | 930 |

Modern manufacturing technologies of seam welded tubes enable continuous production of spiral and longitudinal seam welded pipes, basically aimed at achieving welding rate equalling tube production rate. Continuous production of spiral welded tubes is generally accomplished by automated submerged arc welding (SAW), and by semi- and fully automated high frequency contact welding and induction welding for longitudinally seam-welded tubes, (2). The selection of welding parameters is also important for creating a quality inspection system, since their variation considerably alters the quality of weldments.

THE SUBMERGED ARC WELDING PROCESS

After completion of adjacent joining, near each successive strip end of a new roll, the strip enters the straightening roll system and the main drive rollers. For producing strips of constant width and where hot rolled strip ends may be damaged or with flaws that may develop into a welded joint of poor quality, the strip ends are slit and the edge is trimmed to 15 mm on both sides.

Groove edge preparation assumes machining with oppositely mounted fixed edge cutting tools, with 4–12 degree bevel edges. Sheets prepared in this way enter the industrial tube forming line, and are welded subsequently. Electric motors, as electrode wire feeding source, are placed at the backside of carrier on upper rollers for internal tube welding, and are positioned at the same base with the exterior welding device for external tube welding. Welding flux is delivered with compressed air.

The selection of welding parameters depends on the type and thickness of the base metal. Basic SAW welding parameters are: welding current level and density, welding wire diameter, arc voltage, welding and travel speed, and angle between wire electrode and sheet surface.

The ultrasonic testing device for controlling welds is located at a certain distance from the external welding head. A gas cutting mechanism located at the end of the system cuts tubes to a given length, and the processed tubes are passed along bridge transports to the conveyer belt.

Nakon uklanjanja troske sa površine, šav dolazi na vizuelnu kontrolu, a cevi sa greškom se upućuju na ručnu doradu postupkom zavarivanja 111. Cevi bez uočenih grešaka, kao i cevi na kojima je izvršena popravka, idu na radiografsko ispitivanje X zracima, shodno uslovima standarda za kontrolisanje zavarenog spoja. Cevi sa nedozvoljenim greškama se vraćaju na ručnu doradu, dok se kvalitetne cevi upućuju na strug za obradu krajeva, pripremu stranica žleba za zavarivanje u procesu montaže. Posle ove obrade cevi se upućuju na hidrostatičko ispitivanje. Ispitni pritisak koji će biti primenjen zavisi od standarda izrade, kvaliteta osnovnog materijala, debljine zida i nazivnog prečnika cevi. Prema API Std 5LS ispitni pritisak se izračunava po obrascu:

$$P = \frac{20R_{eH} \cdot s}{D} \text{ (bar)}$$

gde je: R_{eH} (MPa)—nominalni napon tečenja materijala, s (mm)—nazivna debljina zida cevi, D (mm)—nazivni prečnik cevi.

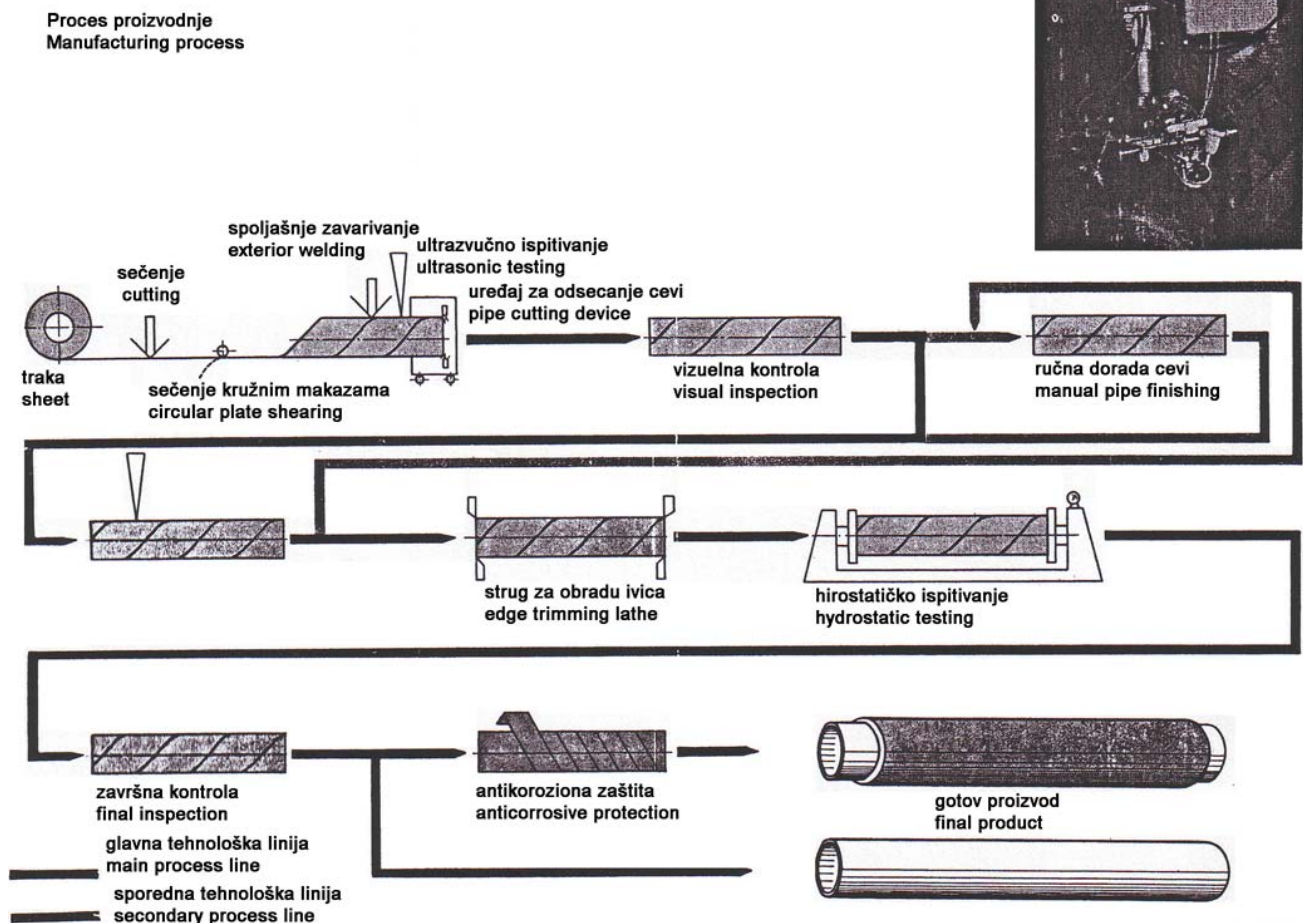
Cevi ispitane na hidrostatički pritisak idu na završnu kontrolu, i na osnovu podataka o međufaznoj i završnoj kontroli formira se fabrički certifikat o kvalitetu cevi. Na sl. 1 je prikazan tehnološki proces proizvodnje i kontrolisanja spiralno zavarenih cevi.

After removing slag from the surfaces, tubes are visually inspected, and those with flaws are manually arc weld repaired (SMAW). Flawless and repaired pipes are sent on to X ray inspection, according to standard rules for welded joint inspection. Pipes with unacceptable flaws are returned for manual welding repair, while quality pipes are end-trimmed and edge grooved for the assembly welding process. Following these processes, pipes are inspected by hydrostatic tests. The value of the applied test pressure will depend on the valid standard for manufacture, base metal quality, pipe wall thickness and diameter. According to API Std 5LS, the test pressure can be obtained from the following formula:

$$P = \frac{20R_{eH} \cdot s}{D} \text{ (bar)}$$

where: R_{eH} (MPa)—nominal yield strength, s (mm)—nominal pipe wall thickness, D (mm)—nominal pipe diameter.

Pipes tested by hydrostatic pressure are sent for final inspection, and the pipe quality certificate is issued based on intermediate and final inspection data. Figure 1 shows the manufacturing process and the process of control and inspection of spiral welded tubes.

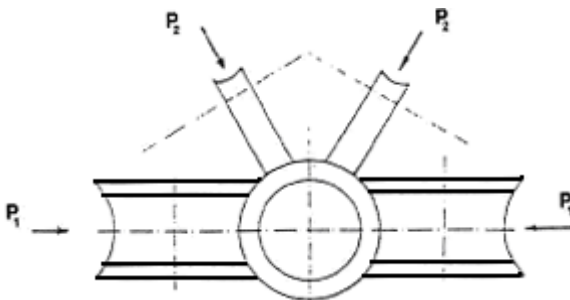


Slika 1. Tehnološki proces proizvodnje i kontrolisanja spiralno zavarenih cevi
Figure 1. The manufacturing and controlling process of spiral welded tubes.

PROCES VISOKOFREKVENTNOG ZAVARIVANJA CEVI

Primenom visokofrekventne struje za zavarivanje, brzina oblikovanja u uređajima za kontinualnu proizvodnju uzdužno zavarenih cevi dostiže 50 m/min. Ostvarivanje velikih brzina zavarivanja, uz zadovoljenje sve strožijih zahteva za kvalitet šavnih cevi, moguće je jedino ako se uzmu u obzir svi uticajni faktori, počev od kvaliteta osnovnog materijala do fine regulacije režima zavarivanja.

Nakon formiranja u uređaju za kontinualno oblikovanje, cev ulazi u zavarivački sklop (sl. 2), gde se stranice formirane cevi približavaju pod uglom γ (sl. 3), zagrevaju i pritiskom spajaju. Značajna uloga zavarivačkog sklopa je u sprečavanju pojave toplih prslina, obezbeđenjem što manjih zaostalih napona u zavarenoj cevi, što se postiže kalibracijom valjaka za pravilan kontakt stranica cevi.



Slika 2. Shema zavarivačkog sklopa
Figure 2. Welding assembly scheme.

Istiskivanje zagrejanog materijala treba da je što manje, posebno sa unutrašnje strane cevi. Proces istiskivanja uslovljen je načinom tečenja materijala i početnog kontakta stranica, a na njegovu veličinu značajan uticaj ima režim zavarivanja, veličina debljine zida cevi i vrsta osnovnog materijala. Unutrašnje istiskivanje materijala u znatnoj meri zavisi od vremena za koje se obavlja proces zavarivanja, tj. vremena plastičnog deformisanja zagrejanih krajeva stranica, vremena formiranja potrebne strukture zavarenog spoja i vremena hlađenja zavarenog spoja do temperature ispod koje nema opasnosti od stvaranja toplih prslina. Pri određivanju temperature zavarivanja, treba zadovoljiti uslov da temperatura u momentu izlaza iz zavarivačkog sklopa bude dovoljno niska, da bi se obezbedila čvrstoća zavarenog spoja.

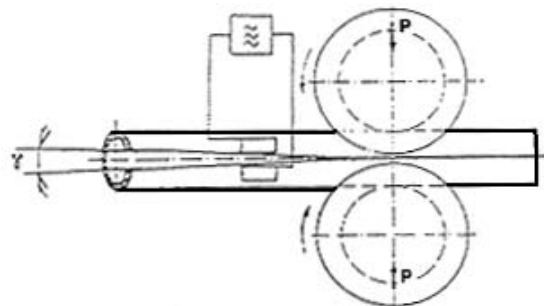
Brzina zavarivanja utiče na plastične deformacije, pritisak na stranicama cevi, debljinu oksidnog sloja na zagrejanim površinama i na istiskivanje materijala. Posledica veće brzine zavarivanja su manje plastične deformacije, manji pritisak na stranicama cevi pre završetka formiranja zavarenog spoja, manja oksidacija zagrejanih površina, manje istiskivanje materijala i manja zona uticaja toplote (ZUT), jer je kraće vreme rasprostiranja toplote po dubini stranica. Prema tome za dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja potrebna je što veća brzina zavarivanja. Međutim, brzina zavarivanja iznad kritične vrednosti izaziva tople prsline. Pri izboru brzine zavarivanja neophodno je uzeti u obzir i karakteristike osnovnog materijala, tolerancije širine i debljine ulazne trake.

Brzina hlađenja zavarenog spoja može da se podesi promenom zapremine zagrejanog materijala, odnosno, izborom struje zavarivanja prema veličini cevi.

HIGH FREQUENCY WELDING OF TUBES

By applying high frequency current in welding, the rate of shaping in machines for producing longitudinal welded pipes reaches 50 m/min. Accomplishing high welding rates, while fulfilling strict requirements for the quality of seamed pipes, is possible only all influencing factors are taken into account, starting with base material quality up to fine controlling of the welding process.

After continuous shaping, pipes enter the welding assembly machine (Fig. 2) where edges of shaped pipes are joined at an angle γ (Fig. 3), heated and joined under pressure. The important role of welding assembly is in preventing the appearance of hot cracks, and is ensured with as low as possible residual stresses in welded tubes, achieved by calibrating rollers for proper contact on tube edges.



Slika 3. Shema konduktivnog zagrevanja
Figure 3. Conduction heating scheme.

Squeezing out warm material should be as little as possible, particularly inside of pipes. The process of squeezing out material is caused by material yield and by initial contact of the edges, and it mostly depends on the welding regime, the pipe thickness, and the base material. The material being squeezed out inside the pipes largely depends on the time of the welding process i.e. the time of plastic deformation of the heated edges, also on the time of welded joint structural formation, and on the time of cooling the welded joints below the temperature below which the appearance of hot cracking is avoided. The welding temperature should be determined by satisfying the condition that the temperature upon exiting the welding assembly process should be low enough as to assure the strength of the welded joints.

Welding speed influences plastic deformation, pressure on pipe edges, the oxide scale value on heated surfaces, and the material that is squeezed out. Consequences of high welding rates are low plastic deformations, low pressure on pipe edges before the completion of welded joints, lower oxidation on heated surfaces, less material being squeezed out, and a smaller heat affected zone (HAZ), because the time that heat transfers through the edges is shorter. Accordingly, welded joint quality is achieved by applying higher welding speeds. However, welding speeds above critical values evoke appearance of hot cracks. It is necessary to consider base material properties, width and thickness tolerances of sheets entering the process when selecting the proper welding speed.

Time cooling rate of the welded joint can be set by changing the warm material net volume, in other words, by selecting the welding current according to the pipe size.

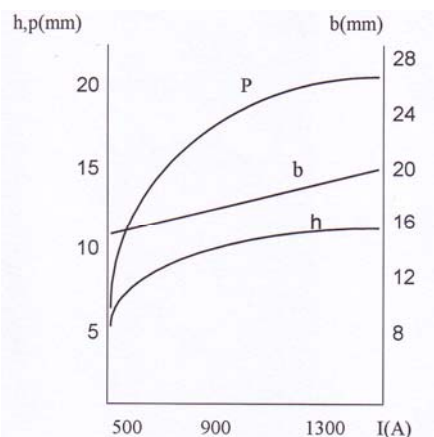
Za dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja potrebno je međusobno usklađivanje temperature zavarivanja, pritiska i vremena zavarivanja.

Posle zavarivanja i skidanja istisnutog materijala, prolazom ispod grejača sledi termička obrada normalizacije zavarenog spoja, kojom se obezbeđuje sitnozrna struktura spoja i time dobre vrednosti žilavosti. Nadalje slede završne operacije: rezanje cevi na određenu dužinu, kontrolisanje magnetoskopskom metodom ispitivanja, ispitivanje hidrostatičkim pritiskom i završna kontrola cevi.

IZBOR PARAMETARA ZAVARIVANJA

EPP postupak zavarivanja

Osnovni parametri EPP postupka zavarivanja su: jačina struje, gustina struje, prečnik elektrodne žice, napon luka, brzina zavarivanja, položaj stuba luka, nagib žice /3, 4, 5/. Jačina struje zavarivanja utiče na količinu istopljenog osnovnog i dodatog materijala u jedinici vremena. Jača struja proizvodi veću količinu deponovanog materijala i manji specifični utrošak praška. Uticaj jačine struje na penetraciju, širinu i nadvišenje prikazan je na sl. 4.



Slika 4. Uticaj jačine struje na penetraciju (p), nadvišenje (h) i širinu šava (b)

Figure 4. Influence of electric current on penetration (p), weld face convexity (h) and width (b).

Sa povećanjem gustine struje povećava se, kako učinak tako i penetracija. Za manji prečnik žice dozvoljava se veća gustina struje. Prečnik žice utiče na penetraciju, nadvišenje i širinu šava. Sa njegovim povećanjem opada penetracija i nadvišenje šava, a znatno se povećava širina šava, sl. 5.

Napon luka utiče na penetraciju, širinu, nadvišenje, spoljni izgled šava, utrošak praška i metalurške reakcije u procesu zavarivanja. Nizak napon stvara nadvišeni šav kruškastog oblika, a preširok šav ukazuje na previsok napon, sl. 6.

Brzina zavarivanja utiče na penetraciju, širinu, nadvišenje, izgled šava, potrošnju praška po dužini šava i na mogućnost stvaranja uključaka. Brzina zavarivanja direktno utiče na količinu unesene toplote po jedinici šava. Povećanje brzine zavarivanja i smanjenje jačine struje jesu dva praktična načina da se smanji količina unesene toplote. Ne manje, važan je i uticaj brzine zavarivanja na udeo osnovnog materijala u ukupnom metalu šava koji se smanjuje sa povećanjem brzine zavarivanja. Prevelika brzina zavariva

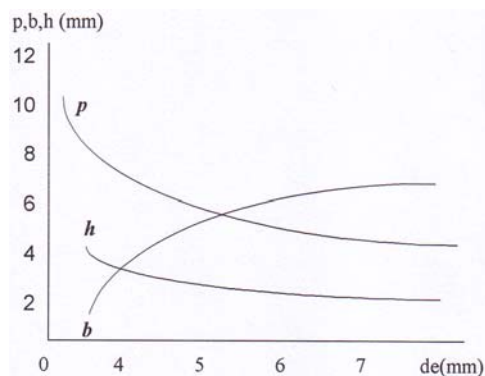
The quality of the welded joint is assured by correlating welding temperature, pressure, and welding time.

When the welding process and the removal of squeezed material are complete, welded joints are heat treated in the following step, thus providing a fine grained microstructure of joints and good toughness values. Everything is ready for final operations: cutting pipes to certain length, magnetic tests, hydrostatic pressure tests and final tube inspection.

SELECTION OF WELDING PARAMETERS

The SAW welding process

Basic SAW welding parameters are: electric current, thickness, welding rod diameter, arc voltage, welding speed, arc position, and wire inclination /3, 4, 5/. Welding current influences the quantity of dissolved base and filler materials. Higher currents create extra quantities of deposited material with less specific consumption of the flux. Figure 4 shows influence of the electrical current on penetration, weld face width and convexity.



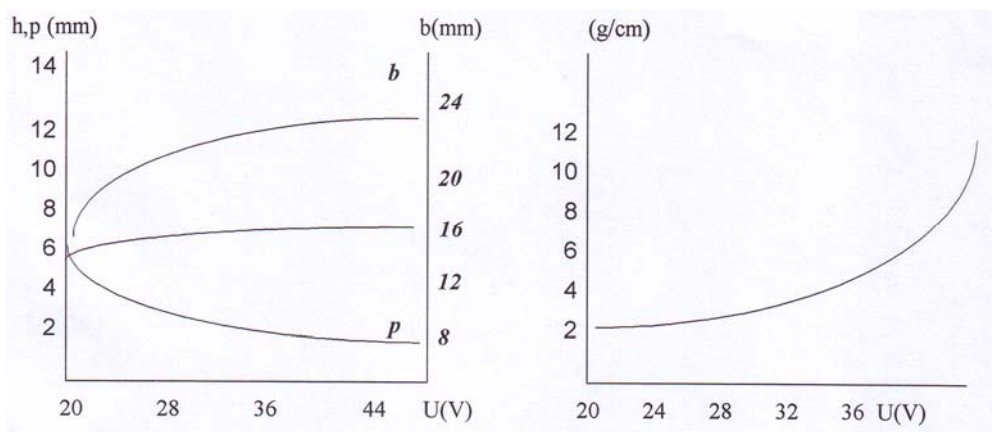
Slika 5. Uticaj prečnika žice na penetraciju (p), nadvišenje (h) i širinu šava (b)

Figure 5. Wire diameter influencing penetration (p), weld face convexity (h) and width (b).

Increased current density enhances performance and penetration. Higher current densities are allowed for smaller wire diameters. Wire diameter influences penetration, weld face convexity and width. Larger diameters cause decrease in penetration and weld face convexity, but face width increases, Fig. 5.

Arc voltage influences penetration, weld face width and convexity, external appearance of joint, flux consumption, and metallurgical reactions in the process. A lower voltage creates pear-shaped welded joints, and a very wide joint indicates a too high voltage value, Fig. 6.

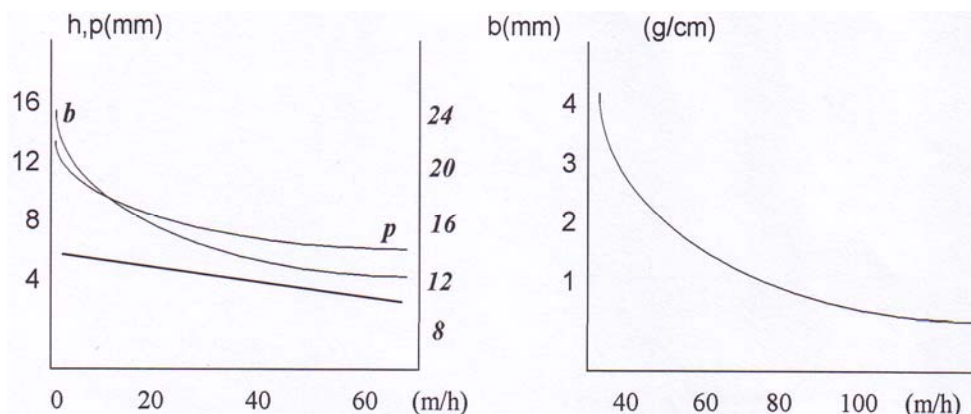
Welding speed influences penetration, weld face width, convexity and shape, flux consumption per length of welded joint, and possibility of formed inclusions. Welding speed directly influences the amount of heat input per length. Increasing weld speed and reducing the current are two ways to reduce the heat input. Nonetheless important is the influence of welding speed on base material fraction in weld metal which decreases by increasing welding speed.



Slika 6. Uticaj napona luka na penetraciju (p), nadvišenje (h) i širinu šava (b) i potrošnju praška
Figure 6. Voltage influencing penetration (p), weld face convexity (h), and flux consumption.

nja dovodi do smanjenja kvašenja, skretanje električnog luka, kao i grešaka kao što su poroznost šava, zarez, nepravilan oblik šava. Povećanje brzine zavarivanja smanjuje penetraciju, širinu i nadvišenje šava kao i potrošnju praška, sl. 7.

High welding speeds lead to lack in wetness, deflection of the arc, and errors such as porosity of the seam, undercuts, and irregular seam shape. Increased welding travel speeds reduce penetration, the weld convexity height and width, as well as flux consumption, Fig. 7.



Slika 7. Uticaj brzine zavarivanja na penetraciju (p), nadvišenje (h) i širinu šava (b) i potrošnju praška
Figure 7. Welding speed influencing penetration (p), weld face convexity (h) and width (b), and flux consumption.

Položaj stuba luka utiče na penetraciju. Potpuno vertikalni stub ne ometa prodiranje tečnog metala u žleb i osnovni materijal. Sa povećanjem brzine zavarivanja naginje se luk i snagom strujanja drži tečni metal iza sebe. Na oblik poprečnog preseka šava utiču još i granulacija praška, dužina slobodnog kraja žice, položaj žice. Ako je prašak sitniji, šav je lepšeg izgleda, penetracija je manja, a širina veća, hlađenje šava sporije i utrošak praška je manji. Ako je grublji prašak, gasovi lakše izlaze iznad sloja praška, a poroznost šava je manja. Za velike brzine zavarivanja obavezno treba koristiti grublji prašak.

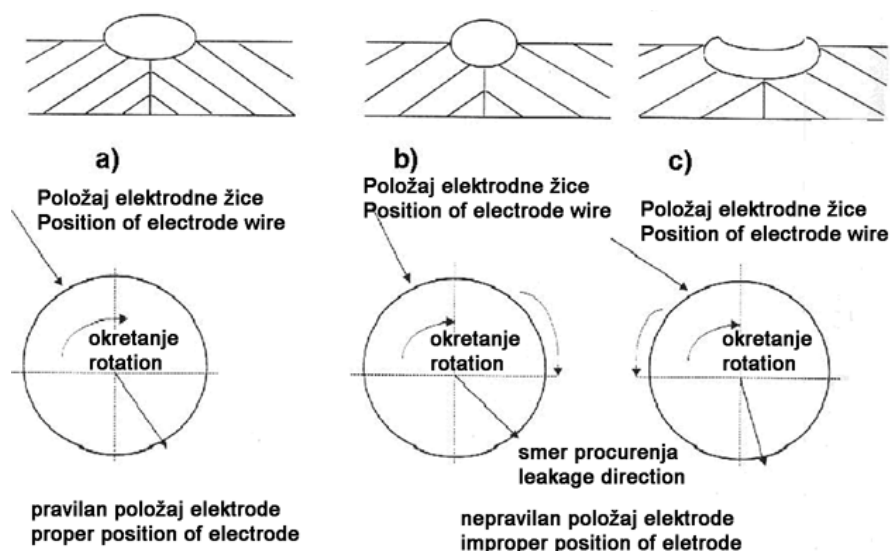
Dužina slobodnog kraja žice ima znatan uticaj pri zavarivanju žicama prečnika manjeg od 4 mm. Njenim povećanjem umanjuje se penetracija. Položaj elektrodne žice pri zavarivanju zaobljenih površina (cevi) razlikuje se od zavarivanja ravnih površina zbog toga što rastopljena kupka u toku zavarivanja ima tendenciju isticanja.

Neodgovarajući položaj elektrode daje duboko provarivanje, dosta nadvišen šav sa pregorenjima po ivicama, sl. 8b. Ako je položaj elektrode previše udaljen od vertikalne ose dobiće se šav sa slabom penetracijom i konkavan, sl. 8c.

Arc position influences penetration. A vertical arc position does not obstruct metal penetrating into the groove and base metal. By increasing welding speed the arc deflects and its flow holds the metal flowing behind. Weld cross section shape is affected by granulated flux, wire stickout length and position. If the flux is fine granulated, the seam looks better, less penetration, the weld is wider, cooling is slower and with less flux consumption. If coarse granulated flux is used, gases easily escape above the flux, and seam porosity is smaller. For higher welding speed, coarse granulated flux should be used.

Wire stickout length has a large influence on the welding process, when the diameter is less than 4 mm. Increased stickout length reduces penetration. The wire position when welding round surfaces (pipes) differs from that when welding flat surfaces because the material tends to flow out of the weld pool during the welding process.

Inadequate wire position leads to too deep penetration, very high convexity with burn-throughs on edges, Fig. 8b. If the wire is positioned too far from the vertical axis, a concave seam with poor penetration is obtained, Fig. 8c.

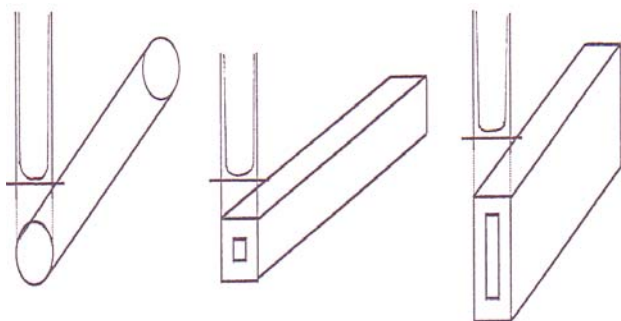


Slika 8. Uticaj položaja elektrode na oblik šava
Figure 8. Position of welding rods influencing the weld shape.

Visokofrekventni postupak zavarivanja

Osnovni parametri visokofrekventnog postupka zavarivanja su: raspodela vremenski promenljive struje, jačina struje – unutrašnja energija, brzina zavarivanja, pritisak valjka /3, 4, 5/.

Struja visoke frekvencije dovodi se u indikator, a u osnovnom metalu (cevi) indukuje se struja koja zagreva krajeve cevi do topljenja. Povlačenjem cevi između valjaka stvara se sila pritiska koja učestvuje u izradi čeličnih cevi prečnika 12–60 mm. U provodniku, u kojem teče, vremenski konstantna struja se raspoređuje po celoj zapremini. Kod cilindričnog provodnika konstantnog preseka takva struja je raspoređena ravnomerno po preseku provodnika. Vremenski promenljiva struja nema tu osobinu, gustina joj je najveća uz površinu provodnika. Ako je frekvencija struje visoka, struja postoji praktično samo u vrlo tankom sloju uz površinu provodnika. Pojava neravnomerne raspodele vremenski promenljive struje u provodnicima dobila je naziv površinski efekat. Primeri raspodele struje visoke učestalosti koja protiče kroz izolovane provodnike različitog oblika prikazana je na sl. 9.

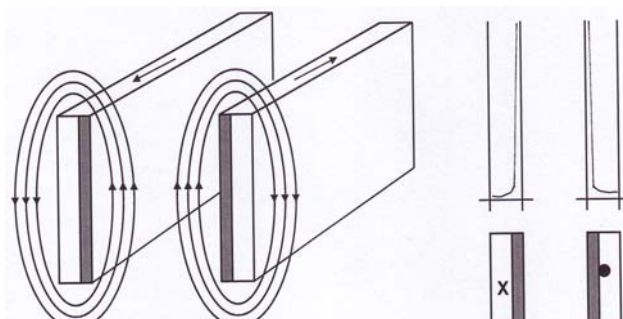


Slika 9. Raspodela struje visoke učestalosti kroz izolovane provodnike različitog oblika
Figure 9. High frequency current distribution through isolated conductors of different shapes.

High frequency welding

Basic parameters of the high frequency welding process are: distribution of electric currents varied in time, current amperage – internal energy, welding speed, roller pressure /3, 4, 5/.

A high frequency current is supplied to the indicator, and current is induced in the base metal that heats pipe ends until up to the melting point. Driving the pipes through rollers exerts a pressure force that contributes to fabricating steel tubes of 12–60 mm in diameter. Electrical conductors distribute the current inside the whole volume. In cylindrical conductors of constant cross-sections, this current is distributed evenly throughout the cross-section. Time varying electric current does not have this feature, and its density is the highest at the surface of the conductor. If current frequency is high, the current will flow only in a thin layer near to the surface of the conductor. The phenomenon of the non-uniform distribution of current varying in time in conductors is known as the skin effect. Examples of high frequency current distribution in isolated conductors of various shapes are shown in Fig. 9.



Slika 10. Shema magnetnog polja između provodnika i efekta blizine: a) magnetno polje između provodnika; b) efekat blizine u pravougaonom provodniku
Figure 10. Magnetic field between conductors and proximity effect: a) magnetic field between conductors; b) proximity effect on rectangular conductors.

Tendencija visokofrekventne struje da se u paru provodnika kroz koje protiče u suprotnim smerovima koncentriše u delovima površine provodnika koji su najbliži jedan drugom naziva se efekat blizine. Fizička pojava koja stoji iza efekta blizine oslanja se na činjenicu da je magnetno polje oko provodnika kroz koje struja protiče u suprotnim smerovima više koncentrisano u uzanom prostoru između njih nego van njih. Zbog toga, gustina struje i apsorpcija energije se povećavaju, kada su provodnici bliži jedan drugom. Efekat blizine je jači i kada su strane koje su okrenute jedna prema drugoj šire kao što je prikazano na sl. 10.

KONTROLA KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA U PROCESU PROIZVODNJE

Na kvalitet zavarenih spojeva utiču mnogi faktori koji delujući kao sistemski ili slučajni mogu dovesti do nižeg ili neodgovarajućeg kvaliteta zavarenih spojeva, pri čemu se pod nižim, odnosno, neodgovarajućim kvalitetom podrazumeva prisustvo jednog ili većeg broja odstupanja.

Obezbeđenje kvaliteta zavarenih spojeva u procesu proizvodnje šavnih cevi postiže se sprovođenjem programa kontrole svih tehnoloških operacija u izradi svake cevi. Međutim, tehnika automatizacije procesa u izradi cevi ne omogućuje da se predvide vrednosti svih faktora za koje se zna da utiču na proces zavarivanja i kvalitet zavarenih spojeva (temperatura, napon, brzina zavarivanja), zato što su međusobno zavisni.

Na osnovu normi API Std 5LS i API 5CT standarda, urađeni su program i planovi kontrole, /1/.

Programom kontrole predviđeno je:

- kontrola osnovnog i dodatog materijala,
- kontrola svake tehnološke operacije u procesu proizvodnje,
- kontrola ispravnosti zavarivačkih uređaja,
- stalna kontrola parametara zavarivanja,
- kontrola elemenata žleba u toku njegove izrade,
- kontrola hemijskog sastava,
- vizuelna i dimenziona kontrola zavarenih spojeva,
- kontrola mera i oblika,
- ultrazvučna kontrola,
- radiografska kontrola.

Svaka formirana cev ima svoj kontrolni list u koji se unose podaci dobijeni ispitivanjem i na osnovu tih podataka donosi se odluka o prijemu ili odbacivanju proizvedene cevi /6, 7, 8/. Značajno mesto u kontroli i upravljanju kvalitetom proizvodnje imaju nerazarajuće metode kontrole. Svaka cev se podvrgava kontinualnom automatizovanom ultrazvučnom ispitivanju, a sva mesta koja se označe kao sumnjiva prozračuju se u posebnim komorama za ispitivanje rendgenom.

Sistemi upravljanja kvalitetom mogu raditi samo na bazi sistematske analize statističkih rezultata o kvalitetu zavarenih spojeva. Poznavanje karakteristika raspodela grešaka u zavarenim spojevima, uzroka njihovog nastajanja i stepena njihovog uticaja na radnu sposobnost, dozvoljava mogućnost regulisanja tehnologije izrade, određivanje obima i tačnosti kontrole kao i mogućnost diferencijalnog prilaza ka normama dozvoljenih u zavarenom spoju.

Uzroci nastajanja grešaka u zavarenim spojevima, u proizvodnom procesu izrade spiralnih i uzdužno zavarenih cevi, uglavnom su poznati. Svaka tehnologija za određeni

The tendency of high frequency currents, flowing in two conductors in opposite directions, to concentrate in parts of the conducting surfaces that are nearest to each other is known as the proximity effect. The proximity effect can be explained by the fact that the narrow space between the two conductors confines a stronger magnetic field than this field is in around them. Because of this, current density and the energy absorption are increased when the conductors are close to one another. The proximity effect is even stronger when the sides facing each other are wider, as is shown in Fig. 10.

QUALITY OF WELDED JOINTS IN THE PRODUCTION PROCESS

The quality of welded joints is influenced by many factors, systematic or random, that may lead to lower or inappropriate quality of welded joints, where lower or inappropriate quality means that one or more deviations from estimated values exist.

Quality assurance of welded joints in the welding of seamed pipes is achieved by controlling all technology procedures in the manufacture of every single tube. However, automated manufacture of tubes cannot help in giving predictions of all factors, that are known to affect the welding process and the quality of welded joints (temperature, voltage, welding speed), because they are mutually dependent.

According to API Std 5LS and API 5CT standards, the programmes and guides of inspection are made, /1/.

The inspection programme consists of the following:

- base and filler metal material inspection,
- inspection of every operation in the manufacturing process,
- inspection of welding devices,
- constant control of welding parameters,
- inspection of groove elements during its processing,
- chemical composition control,
- visual and dimensional inspection of welded joints,
- inspection of measures and shapes,
- ultrasonic inspection,
- radiographic inspection.

Each formed tube has its own inspection sheet with all the information received by testing that are needed for decision making on whether to use or reject the produced tube /6, 7, 8/. An important part in the quality inspection have the non-destructive methods of inspection. Each tube is subjected to continuous automated ultrasonic testing, and all locations marked as suspicious are subjected to X-ray testing.

Quality control systems are based on systematic analysis of statistical results on the quality of welded joints. Knowing the characteristics of the distribution of defects in welded joints, their causes and the degree of their influence on the operating capability, allows for a possibility to regulate the production process, to determine the extent and accuracy of inspection, as well as the possibility to take on a differentiating attitude to allowable guidelines in the welded joint.

Causes for defects appearing in welded joints, in the process of manufacturing spiral and longitudinal seam weld tubes are mostly familiar. Each particular technology for a

osnovni materijal ima svoje karakteristične greške i uzroke njihovog nastajanja.

Analiza grešaka u zavarenim spojevima na spiralno zavarenim cevima

Matematička statistika uspeva da odgovori na mnoga pitanja na koja druge metode uopšte ne bi mogle da odgovore ili bi taj odgovor iziskivao suviše vremena i sredstava. Teorija uzoraka, koja je sastavni deo matematičke statistike, doprinosi da jedno ispitivanje da zadovoljavajuće rezultate uz relativno niske troškove. Da bi se statistička tehnika mogla primenjivati u praksi, neophodno je poznavati elemente verovatnoće i njene raspodele, zatim elemente statistike i teorije uzoraka.

Ispitivanja za analizu grešaka u zavarenim spojevima na spiralno zavarenim cevima, od čelika X60, su izvedena za dva proizvodna procesa EPP postupka zavarivanja, /9/.

Korišćeni parametri zavarivanja su sledeći:

Za I proizvodni proces

- jačina struje za unutrašnji i spoljni šav 580–600 A,
- napon struje za unutrašnji 27 V, a za spoljni šav 28 V,
- brzina zavarivanja 1,4 m/min.

Za II proizvodni proces:

- jačina struje za unutrašnji 620 A, a za spoljni 700 A,
- napon za unutrašnji 27 V, a za spoljni šav 29 V,
- brzina zavarivanja 1,5 m/min.

Ispitivanja bez razaranja su izvršena na dužinama šavova od 24 000 m (dvadesetodnevna proizvodnja za prvi proizvodni proces i šesnaestodnevna za drugi), što se može smatrati optimalnom dužinom vremena sa stanovišta reprezentovanja grešaka. Celokupne dužine šavova najpre su prošle kroz automatsku ultrazvučnu kontrolu radi registrovanja mesta sa greškom, a zatim je radiografskom kontrolom utvrđena vrsta i veličina grešaka.

Upoređenjem rezultata ispitivanja I i II proizvodnog procesa zapaženo je da se isti tip greške ne javlja u istom broju i veličini. Tako je kod I proizvodnog procesa najveći broj utvrđenih grešaka tipa – uključci troske u nizu (3011), a kod II proizvodnog procesa tipa – zajedni (5011). Broj grešaka tipa – izolovani uključci troske (3012), je približno isti za oba proizvodna procesa. Kod oba proizvodna procesa, registrovane su i greške tipa – nedostatak provara (402), a samo kod I registrovane su u zanemarljivom broju greška tipa – loptasti gasni mehur (2011) i prslina (100).

Za sve tipove grešaka na osnovu utvrđenih dužina mogu se prema tabeli 3, za svaku klasu, izračunati karakteristike koje su bitne za zaključivanje o vrsti podele obeležja.

specific base metal has its own typical errors and causes for their appearance.

Analysing errors in welded joints on spiral seam welded pipes

Mathematical statistics manages to give answers to many questions that other methods could not or, that would require more time and means. Pattern theory, as an integral part of mathematical statistics, contributes in obtaining satisfying results with relatively low expenses. In order to apply the statistical method it is necessary to be acquainted with the probability of components and their distribution, also the statistical elements and pattern theory.

Tests for analysing defects in welded joints of spiral seam welded tubes, made of X60 steel, are performed on two SAW welding processes, /9/.

The following welding parameters are used:

In the production process I:

- electric current for internal and external weld, 580–600 A,
- voltage for internal weld 27 V, and external weld is 28 V
- welding speed is 1,4 m/min.

The second production process:

- electric current, internal welding 620 A, external welding 700 A,
- voltage internal welding 27 V, external welding 29 V,
- welding speed 1.5 m/min.

Non-destructive tests were performed on welded joints with length of 24 000 m (the twenty-day first production and a sixteen-day process for second production) which may be considered as the optimal time with respect to error presentation. Entire seam lengths went through automatic ultrasonic inspection for detecting error locations, and was followed by radiographic inspection for determining error type and size.

Comparing the results from the first and second process of production it is noticed that the same type of errors do not occur with the same size and number. The most frequent type of error in the first process were – linear slag inclusions (3011), and in the second process – undercuts (5011). The number of errors – isolated slag inclusions (3012) were nearly the same in both processes. In both processes the following errors were also detected: lack of penetration (402), and gas pores (2011) and cracks (100) of a negligible number were detected only in the first process.

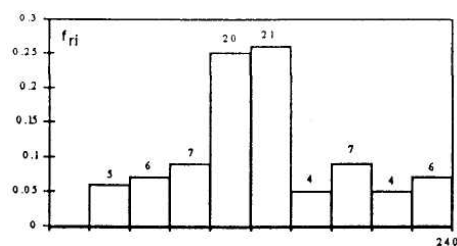
According to Table 3, based on lengths of all defect types and classes, the characteristics are determined that are important for reaching conclusions on type and designation.

Tabela 3. Empirijske vrednosti funkcije raspodele
Table 3. Empirical values for the distribution function.

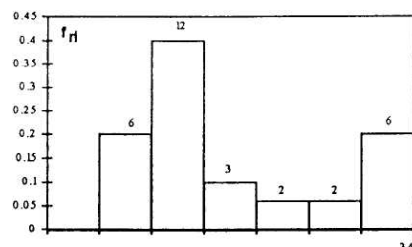
| Klasa greške [mm] Error class | Sredina klase [mm] Mean class | Relativna frekvencija Relative frequency $f_i = n_i / \sum n_i$ | Kumulativna relativna frekvencija Cumulative relative frequency $F_i = \sum f_i$ |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 1 | X1 | f_1 | F_1 |
| 2 | X2 | f_2 | F_2 |
| ... | ... | ... | ... |
| i | X_i | f_i | F_i |

Rezultati statističke obrade dužina grešaka, koji su registrovani u značajnom obimu, prikazani su na sl. 11 za I proizvodni proces i na sl. 12 za II proizvodni proces.

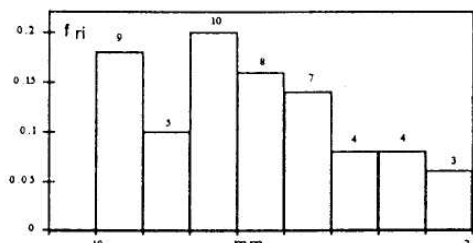
Results received in analysing errors are shown in Fig. 11 for the first production process and in Fig. 12 for the second process.



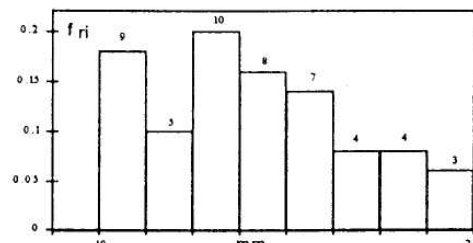
a) Uključci u nizu (linear slag inclusions) (3011), Σn = 80



c) Nedostatak provara (lack of penetration) (402), Σn = 31



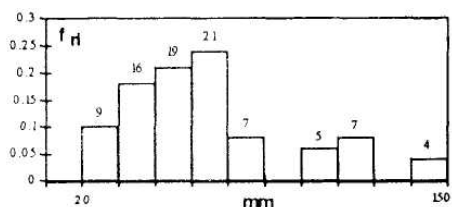
b) Izolovani uključci troske (isolated slag inclusions) (3012), Σn = 50



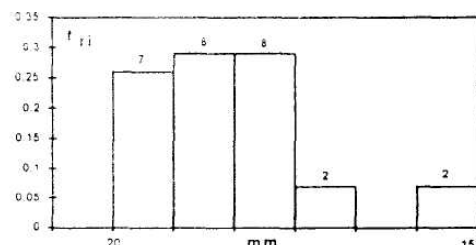
d) Zajed (undercuts) (5011), Σn = 30

Slika 11. Histogrami raspodele za greške iz I proizvodnog procesa

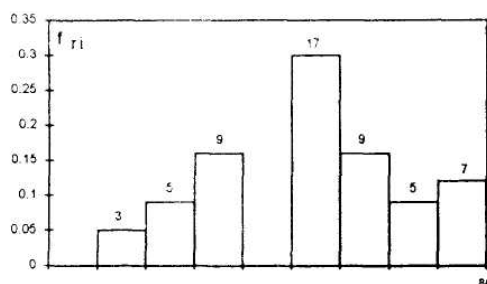
Figure 11. Histograms of errors from the first production process.



a) Zajed (undercuts) (5011), Σn = 88



c) Uključci u nizu (linear slag inclusions) (3011), Σn = 27



b) Izolovani uključci troske (isolated slag inclusions) (3012), Σn = 55

Slika 12. Histogrami raspodele za greške iz II proizvodnog procesa

Figure 12. Histograms of errors from the second production process.

U mnogim radovima je pokazano da se karakteristike grešaka kod zavarenih spojeva dobro opisuju dvoparametarskom Weibulovom raspodelom, što je potvrđeno i u ovim analizama. Vrednosti parametara Weibulove raspodele za sve tipove grešaka I i II proizvodnog procesa, date u tabeli 4, određene su grafičkim putem korišćenjem Weibulovog verovatnosnog papira po metodi izloženoj u radu.

Prihvatljivost Weibulovog zakona raspodele proverena je i potvrđena testom χ^2 (hi-kvadrat). Naknadne analize su pokazale da se raspodele grešaka tipa – uključci troske u nizu i – izolovani uključci troske, mogu aproksimirati i normalnim zakonom raspodele, a greške tipa – zajed, eksponencijalnim zakonom raspodele.

Greške koje se javljaju u zavarenim spojevima, izvedenim visokofrekventnim zavarivanjem klasificirane prema API 5LS standardu, su sledeće:

Many studies show that features of welded joints errors can be described by using two parametric Weibull distribution methods as it is confirmed in this analysis. Parametric values of Weibull distribution for all types of errors in both the first and second processes, are given in Table 4 and are graphically presented using the Weibull method as described in this paper.

Acceptability of the Weibull law is checked and confirmed by χ^2 (chi-squared) test. Additional analyses demonstrated that error distributions as – linear slag inclusions and – isolated inclusions can also be approximated by regular distribution law, and errors as – undercuts, by exponential distributional law.

The following errors appearing in welded joints, produced by high frequency welding are classified according to API 5LS standard as:

Tabela 4. Parametri Weibulove raspodele za greške I i II proizvodnog procesa
Table 4. Parametric values of Weibull's error distribution for first and second production processes.

| Veibulova dvoparametarska raspodela Two parametric Weibull distribution | $t(X) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{X}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{X}{\eta}\right)^\beta\right], F(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X}{\eta}\right)^\beta\right]$ | | | |
|--|---|---------|---|---------|
| Parametri raspodele Distribution parameters | η [mm] | β | η [mm] | β |
| Tip greške Error type | I proizvodni proces The first production process | | II proizvodni proces The second production process | |
| Uključci troske u nizu Linear slag inclusions | 125 | 2.90 | 99 | 1.6 |
| Izolovani uključci troske Isolated slag inclusions | 115 | 1.65 | 56.5 | 3.28 |
| Zajedi Undercuts | 52 | 0.60 | 66 | 1.95 |
| Nedostatak provara Lack of penetration | 110 | 1.00 | | |

- Mehaničke greške na osnovnom materijalu, usled transporta trake i cevi i usled uzdužnog sečenja trake.
- Greške osnovnog materijala i šava: neuvarivost (prslina), ljuskavost, dvoplatnost (dvoslojnost), lučne pregoretine, denivelacija.

Ispitivanja zavarenih spojeva na uzdužno zavarenim cevima od čelika X60, visokofrekventnim postupkom, su takođe izvršena na dužini šava od 24 000 m (dvaneastodnevna proizvodnja) jednog proizvodnog procesa sledećim parametrima zavarivanja: jačina struje 24 A, napon 12 kV, brzina zavarivanja 15,5 m/min. Greške registrovane u toku ispitivanja date su u tabeli 5.

- Mechanical errors in the base metal, occurring in the transportation of sheet and tubes, and occurring while longitudinal plate shearing.
- Base and weld metal errors: incomplete fusion (cracks), flakes, lamination, burn throughs, incomplete fills.

Longitudinal welded joints made of X60 steel by high frequency welding are tested on seam length of 24 000 m (twelve-day production) in a single manufacturing process, where the following welding parameters were applied: current 24 A, voltage 12 kV, welding speed 15.5 m/min. Errors detected in the test are given in Table 5.

Tabela 5. Greške u zavarenim spojevima uzdužno zavarenih cevi
Table 5. Errors in spiral welded tubes.

| Redni broj Number | Vrsta greške Error type | Greške (m) Errors (m) | Popravljene cevi (m) Repaired tubes (m) | Odbačene cevi (m) Rejected tubes (m) |
|-------------------------------|--|--------------------------|--|---|
| 1 | Mehaničke greške Mechanical errors | 220 | 103 | 117 |
| 2 | Greške osnovnog materijala šava Base metal errors | | | |
| a | Neuvarivost Incomplete fusion | 143 | 62 | 81 |
| b | Ljuskavost Flakes | 78 | 38 | 40 |
| c | Dvoplatnost Lamination | 165 | 39 | 126 |
| d | Lučne progoretine Burn through | 21 | 14 | 7 |
| e | Denivelacija Incomplete fills | 226 | 82 | 144 |
| Ukupna dužina Total length | | 853 | 338 | 515 |

Ispitivanja su pokazala da se greške uglavnom javljaju zbog lošeg kvaliteta osnovnog materijala i nedovoljne pažnje u pripremi traka (podužno sečenje trake) kao i nedovoljne pažnje u procesu oblikovanja i zavarivanja cevi. Detaljnija analiza ovih grešaka nije bila potrebna, s obzirom da se njihovo smanjenje može ostvariti većim angažovanjem u proizvodnom procesu i blagovremenim reagovanjem od strane prateće kontrole.

Rezultati ispitivanja pokazuju da su i pri odgovarajućem nivou izrade, zbog specifičnosti proizvodnog procesa, moguća kolebanja grešaka u zavarenim spojevima u širu

Testing results showed that errors appear due to low quality of the base metal, inadequate sheet preparation (longitudinal plate shearing), and inadequate shaping and welding of tubes. A further analysis of these errors was not required, considering that they can be reduced with more personal involvement in the manufacturing process by taking timely actions of the inspection.

Test results show that even in the appropriate manufacturing process, due from its particularity, some errors are widely scattered in the welded joints. As is shown, the occurrence of defects is influenced by all of the welding

kim granicama. Pokazalo se da na pojavu grešaka imaju uticaja svi parametri zavarivanja i da najveći pozitivan uticaj ima struja zavarivanja, a negativan brzina zavarivanja. Ovo ne važi jedino kada su u pitanju greške tipa – izdvojeni uključci troske. Analize su pokazale da se optimalni uslovi zavarivanja postižu sa prosečnom brzinom zavarivanja i ostalim parametrima na gornjem nivou preporučenih vrednosti.

Pojava grešaka na određenoj dužini šava može biti posledica zajedničkog ili pak pojedinačnog uticaja parametara zavarivanja, što je posebno izraženo kod EPP postupka zavarivanja. Takođe, u velikom broju slučajeva uticaj jednog parametara može imati za posledicu pojavu različitih vrsta grešaka.

Na osnovu rezultata ispitivanja spiralno zavarenih cevi, popravljeno je 10%, a odbačeno 2% cevi iz I proizvodnog procesa, i, popravljeno 9%, a odbačeno 1% cevi iz II proizvodnog procesa. Upoređujući rezultate ispitivanja zavarenih spojeva na spiralno zavarenim cevima iz I i II proizvodnog procesa, kao i mogućnosti njihove popravke, može se zaključiti da je II proizvodni proces ekonomski opravdaniji.

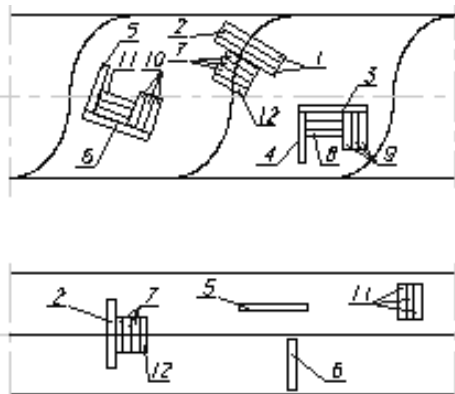
Greške koje se javljaju pri izradi uzdužno zavarenih cevi visokofrekventnim postupkom su uglavnom posledica tehnoloških mogućnosti za izradu cevi i propusta u kontroli proizvodnog procesa.

Za povećanje kvaliteta zavarenih spojeva i radnih sposobnosti šavnih cevi, od velikog značaja bi bila realizacija diferencijalnog prilaza ocene kvaliteta u zavisnosti od opterećenosti zavarenih spojeva u procesu eksploatacije.

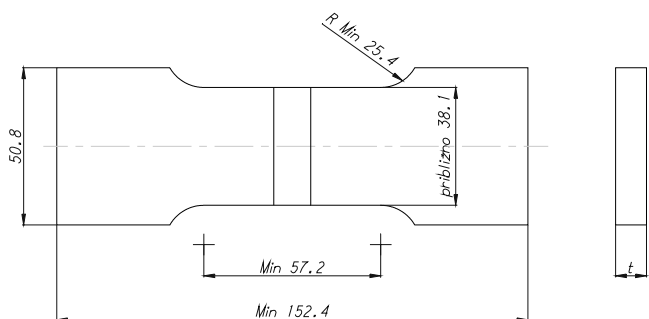
MEHANIČKA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA

Ispitivanja su sprovedena na spiralno i uzdužno zavarenim cevima od mikrolegiranih čelika X60 i J55, koje su prošle kroz kontrolu, u okviru proizvodnog programa „SARTID“ – Fabrike šavnih cevi. Za izradu spiralno zavarenih cevi od čelika X60 koristi se postupak zavarivanja EPP, a za izradu uzdužno zavarenih cevi od čelika X60 i J55, visokofrekventni (VF) postupak, /10, 11/.

Položaj uzoraka za izradu epruveta iz šavnih cevi, prikazan je na sl. 12, a potrebna ispitivanja su normirana standardima API, tab. 6.



Slika 12. Položaj uzoraka za izradu epruveta iz zavarenih cevi
Figure 12. Welded joint tube sample test position.



Slika 13. Epruveta za ispitivanje zavarenog spoja
Figure 13. Welded joint sample test tube.

parameters, where current has the most positive effect, while welding speed has a negative effect. This is not valid only with the following errors are in question – isolated slag inclusions. Analyses have are shown that optimal welding conditions are achieved with a mean value of welding speed and by other parameters that should have top levels of recommended values.

Errors appearing at some lengths in the welded joints may be caused from mutual or from individual effects of the welding parameters, which are particularly depicted in SAW welding. Also, in many cases a single parameter can influence the occurrence of various types of errors.

Based on test results of spiral seam welded tubes, 10% in the first production process have been repaired, and 2% were rejected, but in the second process 9% were repaired and 1% is rejected. By comparing results from the first and second process of spiral seam welded tubes, and concerning the possibilities for reparation, we can conclude that the second process has shown to be more economical.

Errors occurring in the process of longitudinal seam welding pipes by high frequency welding are mostly caused by the tube processing technology and by mistakes made in the inspection.

In order to increase the quality of welded joints and the working capacity of seam welded tubes, the differential approach to quality assessment is needed, depending on the loads acting on welded joints in exploitation.

MECHANICAL TESTING OF WELDED JOINTS

Tests were conducted on spiral and longitudinal seam welded tubes made of microalloyed steels X69 and J55, that have been inspected within the manufacturing programme of SARTID – Weld Tubing Factory. Spiral seam welded joints of X60 steel are welded by SAW process, and longitudinally seam welded joints of X60 and J55 steels are welded by high frequency process, /10, 11/.

A tube position for preparing test samples is shown in Fig. 12, and all the required tests are done according to API, Table 6.

Tabela 6. Pregled predvidenih ispitivanja
Table 6. Review of anticipated tests.

| Poz. | Ispitivanje Test | Položaj epruveta Test sample position | Oznaka Mark |
|------|--------------------------|--|----------------|
| 1 | Savijanje Bending | Normalno na šav Perpend. to welded joint | NW |
| 2 | Zatezanje Tensile | Normalno na šav Perpend. to welded joint | NW |
| 3 | Zatezanje Tensile | Paralelno sa osom cevi Parallel to tube axis | POC |
| 4 | Zatezanje Tensile | Normalno na osu cevi Perpend. to tube axis | NOC |
| 5 | Zatezanje Tensile | Paralelno sa pravcem valjanja Parallel to rolling direction | PV |
| 6 | Zatezanje Tensile | Normalno na pravac valjanja Perpend. to rolling direction | NV |
| 7 | Žilavost Toughness | Normalno na šav Perpend. to welded joint | NW |
| 8 | Žilavost Toughness | Paralelno sa osom cevi Parallel to tube axis | POC |
| 9 | Žilavost Toughness | Normalno na osu cevi Perpend. to tube axis | NOC |
| 10 | Žilavost Toughness | Paralelno sa pravcem valjanja Parallel to rolling direction | PV |
| 11 | Žilavost Toughness | Normalno na pravac valjanja Perpend. to rolling direction | NV |
| 12 | Mikrošlif Micropolish | Normalno na šav Perpend. to welded joint | NW |

Ispitivanje zatezanjem

Epruveta za ispitivanje zavarenog spoja prema Standardu ASTM A370 prikazana je na sl. 13.

Rezultati mehaničkih ispitivanja na zatezanje pokazuju da čelik X60, zavaren postupkom EPP, ima sledeće vrednosti zatezne čvrstoće:

- normalno na šav $R_m = 659 \text{ N/mm}^2$
- paralelno sa osom cevi $R_m = 587 \text{ N/mm}^2$
- normalno na osu cevi $R_m = 594 \text{ N/mm}^2$
- paralelno na valjanje $R_m = 597 \text{ N/mm}^2$
- normalno na valjanje $R_m = 604 \text{ N/mm}^2$

Čelik X60, zavaren visokofrekventnim postupkom, ima sledeće vrednosti zatezne čvrstoće:

- normalno na šav $R_m = 721 \text{ N/mm}^2$
- paralelno na valjanje $R_m = 688 \text{ N/mm}^2$
- normalno na valjanje $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$

Čelik J55, zavaren visokofrekventnim postupkom, ima vrednosti zatezne čvrstoće:

- paralelno sa osom cevi $R_m = 587 \text{ N/mm}^2$,
- izduženje $A_5 = 28,7\%$
- kontrakcija $Z_5 = 34\%$.

Upoređivanjem rezultata vidi se da je zatezna čvrstoća veća pri visokofrekventnom postupku i to: normalno na šav 9%, paralelno na valjanje za 15%, i normalno na valjanje za 16%.

Rezultati ispitivanja su pokazali da je srednja vrednost zatezne čvrstoće zavarenog spoja na cevima izrađenim visokofrekventnim postupkom zavarivanja od čelika X60 veća za 12,2% od srednje vrednosti zatezne čvrstoće zavarenog spoja cevi izrađene postupkom EPP.

Deformacione karakteristike osnovnog materijala zavarenog postupkom EPP veće su od deformacionih karakteris

Tensile tests

Welded joint test tubes according to ASTM A370 are shown in Fig. 13.

Results from mechanical tests show that the SAW welded steel X60 has the following results of tensile strength:

- perpendicular to welded joint $R_m = 659 \text{ N/mm}^2$
- parallel to tube axis $R_m = 587 \text{ N/mm}^2$
- perpendicular to tube axis $R_m = 594 \text{ N/mm}^2$
- parallel to rolling direction $R_m = 597 \text{ N/mm}^2$
- perpendicular to rolling direction $R_m = 604 \text{ N/mm}^2$

Steel X60, welded by high frequency process, showed the following tensile strength values:

- perpendicular to welded joint $R_m = 721 \text{ N/mm}^2$
- parallel to rolling direction $R_m = 688 \text{ N/mm}^2$
- perpendicular to rolling direction $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$

Steel J55, welded by high frequency process, showed the following tensile strength values:

- parallel to tube axis $R_m = 587 \text{ N/mm}^2$
- elongation $A_5 = 28.7\%$
- contraction $Z_5 = 34\%$.

By comparing the results, it can be seen that in high frequency welding the tensile strength values were higher: 9% perpendicular to welded joint, and by 15% parallel to rolling direction, and by 16% perpendicular to rolling direction.

Test results are showing that tensile strength mean value on tubes made of X60 steel by high frequency welding is 12.2% higher than the tensile strength mean value on tube welded joint made by SAW.

Base metal strain characteristics in SAW welds are higher than strain characteristics obtained by high frequency welding, where the elongation is 34.6% higher and the contraction is 40.2% higher. This means that the base

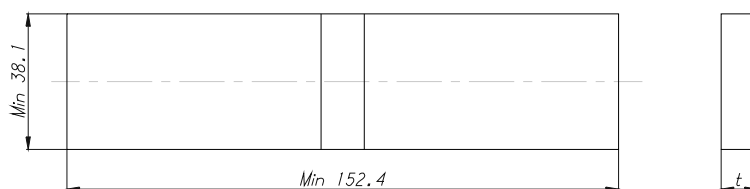
tika materijala zavarenog visokofrekventnim postupkom, pri čemu je izduženje veće za 34,6%, a kontrakcija za 40,2%. To govori da osnovni materijal, zavaren visokofrekventnim postupkom, ima znatno slabije deformacione karakteristike, što za sobom povlači veću sklonost ka krtom lomu, što je potvrđeno i rezultatima pri ispitivanju žilavosti.

Zatezne karakteristike zavarenog spoja cevi, izrađenih od čelika J55 visokofrekventnim postupkom zavarivanja, nalaze se u propisanim granicama prema API normama.

Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem prema standardu ASTM 370 izvodi se na epruvetama definisanim normama API, sl. 14.

Sve ispitane epruvete savile su se za 180° bez pojave prslina. To se može objasniti zadovoljavajućom homogenizacijom strukture zavarenog spoja do koje je došlo pod dejstvom uticaja toplote kojima je bila izložena masa prvog nanetog unutrašnjeg sloja pri kasnijem formiranju spoljašnjeg sloja šava.



Slika 14. Epruveta za ispitivanje savijanjem u tri tačke
Figure 14. Three-point bending test tube sample.

Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće na probnim uzorcima, zavarenim postupkom EPP, izvršena su Brinelovom metodom HBS 2,5/187,5/15, a na probnim uzorcima zavarenim visokofrekventnim postupkom, Vickersovom metodom HV30.

Ispitivanje tvrdoće materijala X60, zavarenog postupkom EPP, pokazala su da je tvrdoća u metalu šava 8 do 13% veća od tvrdoće u ZUT i u osnovnom materijalu. Tvrdoća metala šava materijala X60, zavarenog visokofrekventnim postupkom, veća je za 50 do 80 Vickersovih jedinica od tvrdoće osnovnog materijala i ZUT, a tvrdoća metala šava materijala J55 približno je jednaka tvrdoći osnovnog materijala, ili manja za 7 do 20 Vickersovih jedinica, a veća od tvrdoće ZUT za 2 do 17 Vickersovih jedinica. Rezultat merenja tvrdoće grafički je prikazan na sl. 15.

metal, high frequency welded, has considerably lower strain characteristics and is more prone to brittle failure, which is confirmed in the results of toughness tests.

Values of tensile strength characteristics of tube welded joints, made of J55 steel by high frequency process, are within the limits according to API.

Bend tests

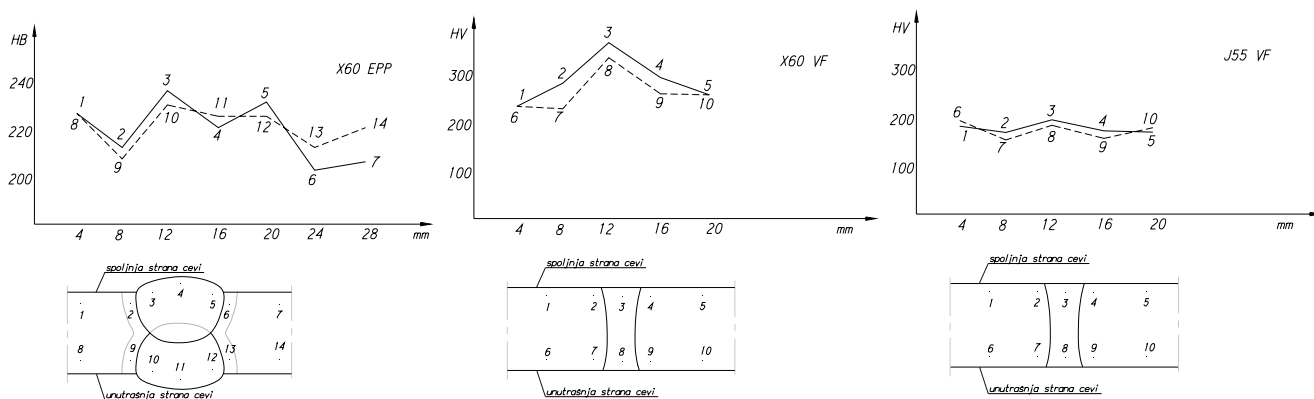
Bend tests are performed according to ASTM 370 regulations, and are done with test tubes according to API, Fig. 14.

All of the tested tubes are bent to 180° without cracking. This is explained by the satisfying homogenization of micro structure in the welded joint which is achieved by the heating influence to the first deposited internal layer while subsequent welding of the external layer.

Hardness test

Tests are performed on trial specimens, joined by SAW process, according to Brinell test method HBS 2.5/187.5/15, and on trial specimens welded by high frequency process, by applying the Vickers method HV30.

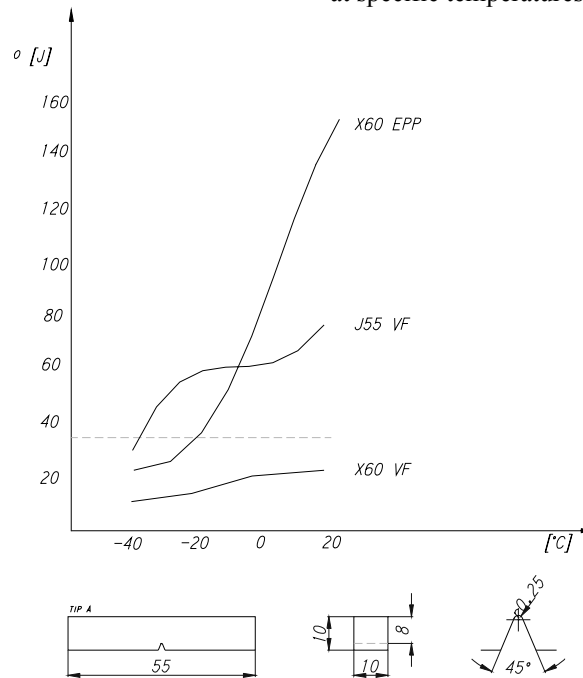
The material welded by SAW, designated as steel X60, had hardness results values by 8 to 13% higher than that of the HAZ and base metal material. The hardness value of the weld metal in the high frequency welded joint of X60 is 50–80 Vickers units higher than the hardness value of base metal and HAZ, and the hardness value of J55 weld metal is approximate to that of the base metal, or 7–20 Vickers units lower, and yet 2–17 Vickers units higher than that of the HAZ. Results of hardness tests are presented in Fig. 15.



Slika 15. Dijagrami tvrdoće spoljašnje i unutrašnje zone šavnih cevi
Figure 15. Diagrams of hardness for external and internal zones of welded joint.

Ispitivanje udarne žilavosti

Ispitivanja su izvedena standardnim postupkom po API 5LS, pri čemu je korišćen teg mase 15 kg da bi se dobila dovoljna energija za lom epruvete. Udarne žilavost je određena korišćenjem epruvete sa V zarezom. Rezultati ispitivanja udarne žilavosti za određene temperature prikazani su grafički na sl. 16.



Slika 16. Rezultati ispitivanja žilavosti
Figure 16. Toughness test results.

Upoređujući udarnu žilavost šava zavarenog EPP i visokofrekventnim postupkom, uočava se da je udarna žilavost u postupku EPP veća: na 20°C za 85,9%, na 0°C za 80,2%, na -20°C za 57,5% i na 40°C za 44,1%, pa se može konstatovati da se cevi, zavarene visokofrekventnim postupkom, ne mogu upotrebiti za odgovorne cevovode.

Na osnovu izvršenih ispitivanja, urađena su istraživanja žilavosti loma čeličnih parovoda, /12/, mogućnosti primene inženjerskih metoda mehanike loma za ocenu integriteta zavarenih spojeva, /13, 14/, kao i uticaj korozije na čelične zavarene cevi, /15/.

KORELACIJA PARAMETARA ZAVARIVANJA I POKAZATELJA MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Uticaj parametara zavarivanja na kvalitet zavarenih spojeva šavnih cevi treba uzeti u obzir, ne samo pri postavljanju i analizi procesa zavarivanja, već i za razradu uređaja za zavarivanje, kontrolno-merne i regulacione opreme. Uticaj pojedinih parametara procesa zavarivanja može se izraziti koeficijentom korelacije sa pokazateljima kvaliteta. U tom slučaju to su zatezna čvrstoća i žilavost zavarenog spoja, /16/.

U praksi se često sreću pojave sa dve slučajno promenljive veličine i one se prikazuju u dvodimenzionalnom koordinatnom sistemu. Za veći broj promenljivih dobija se skup veličina čija se međusobna zavisnost može, uz izvesna uprošćenja, predstaviti kao statička povezanost ili korelacija.

Toughness tests

Tests were made according to the standard procedure API 5LS, and for that purpose a 5 kg drop weight was used in order to provide sufficient energy to fracture the test specimen. Impact toughness is determined by using pre-notched standard test specimens. Impact toughness results at specific temperatures are presented in Fig. 16.

Comparing impact toughness results of SAW and high frequency procedures, it is noticed that impact toughness values are higher for the SAW joint: by 85.9% at 20°C; by 80.2% at 0°C; by 57.5% at -20°C and by 44.1% at 40°C; so it is concluded that high frequency welded tubes cannot be used for critical pipelines.

Based on performed tests, research of fracture toughness of steel seam welded piping /12/ has been carried out, the possibilities of applying fracture mechanics engineering methods for integrity assessment of welded joints were analysed, /13, 14/, and also corrosion influences on steel welded tubes, /15/.

CORRELATION OF WELDING PARAMETERS AND MECHANICAL PROPERTIES INDICATORS

Influences of welding parameters on the quality of seam welded tubes must be considered, not only in setting up the process and its analyses, but also for welding device operation and for other control-regulating installations. Influence of certain welding parameters can be expressed by the quality indicator coefficient. In this case, those are tensile strength and welded joint toughness, /16/.

In practice, usually processes have two random variables that are presented in a two-dimensional coordinate system. In case of multiple variables, a group of quantities is obtained whose mutual dependency can be represented, with certain simplifications, as a static interrelation or correlation.

Ako je X_{ij} uticaj jednog od parametara zavarivanja, a Y_{kj} pokazatelj kvaliteta zavarenog spoja, tada za seriju eksperimenata važi jednakost:

$$\|Y_{kj}\| = \varphi \|X_{ij}\|$$

gde je: φ —linearna funkcija koja povezuje uticaj parametara zavarivanja i pokazatelja kvaliteta zavarenog spoja; i —redni broj promenljive (parametra zavarivanja), $i = 1, 2 \dots n$; j —redni broj ispitivanja i -tog parametra, $j = 1 - N$; k —redni broj pokazatelja kvaliteta zavarenog spoja.

Koeficijent korelacije R_{jk} karakteriše uticaj i -te promenljive (parametra zavarivanja) na pokazatelj kvaliteta Y_k . Što je njegova vrednost veća, to je veći uticaj tog parametra na kvalitet zavarenih spojeva. Određuje se izrazom:

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_i)(Y_{ki} - \bar{Y}_k)}{\sqrt{S_{X_i} \cdot S_{Y_k}}}$$

gde su: $\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}$ i $\bar{Y}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_{kj}$

srednja vrednost promenljivih, a

$$S_{X_i}^2 = \frac{1}{1-N} \sum_{j=1}^N \Delta X_{ij}^2 \text{ i } S_{Y_k}^2 = \frac{1}{1-N} \sum_{j=1}^N \Delta Y_{kj}^2$$

dispersija promenljivih

$$\Delta X_{ij} = X_{ij} - \bar{X}_i \text{ i } \Delta Y_{kj} = Y_{kj} - \bar{Y}_k$$

S obzirom da na kvalitet zavarenih spojeva utiču odstupanja parametara zavarivanja od optimalnih vrednosti, to su ona i korišćena pri proračunu korelacije pokazatelja kvaliteta i parametara zavarivanja.

Za analizu su korišćeni rezultati ispitivanja uzoraka zavarenih spojeva cevi izrađenih od čelika X60, EPP i VF postupkom zavarivanja. Odabrani parametri zavarivanja X_i su: srednje vrednosti jačine struje, napona i brzine zavarivanja napred razmatranih procesa proizvodnje. Za granice dozvoljenih odstupanja usvojene su razlike parametara zavarivanja između dva razmotrena procesa proizvodnje, tab. 9. Rezultati proračuna koeficijenta korelacije parametara zavarivanja dati su u tab. 10 i 11.

Tabela 9. Srednje vrednosti parametara za EPP i VF postupak zavarivanja
Table 9. Average parameters for SAW and HF welding processes.

| Naziv Term | Oznaka parametra Parameter | Postupak Process | Vrednost Value |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------|
| Jačina struje Electric current | X_1 | EPP | 625 A |
| | | VF | 23.5 kA |
| Napon Voltage | X_2 | EPP | 28 V |
| | | VF | 12.5 V |
| Brzina zavarivanja Welding speed | X_3 | EPP | 0.5 m/min |
| | | VF | 14 m/min |

Tabela 10. Korelacija parametara zavarivanja i pokazatelja kvaliteta za EPP postupak
Table 10. Influence of welding parameters in the SAW process.

| Broj ispitanih uzoraka Number of tested samples | Parametri zavarivanja Welding parameters | | | Pokazatelji kvaliteta Quality indicators | Koeficijent koleracije Coefficient of correlation | | |
|--|---|-------|-----------|---|--|-------|-------|
| | I (A) | U (V) | V (m/min) | | R_{ik} | | |
| 40 | 625 | 28 | 1.45 | Zatezna čvrstoća Tensile strength | X_1 | X_2 | X_3 |
| | | | | 0.76 | 0.61 | 0.56 | |
| | | | | Udarne žilavost Impact toughness | X_1 | X_2 | X_3 |
| | | | | 0.84 | 0.70 | 0.58 | |

If X_{ij} is the influence of a welding parameter, and Y_{kj} is the quality indicator of the welded joint, then the following relation is used for a series of experiments:

$$\|Y_{kj}\| = \varphi \|X_{ij}\|$$

where: φ —linear function that correlates the influence of welding parameters and the welded joint quality indicator; i —ordinal number of a variable (welding parameter), $i = 1, 2, \dots, n$; j —ordinal number of a tested parameter i , $j = 1 - N$; k —ordinal number of the welded joint quality indicator.

The correlation coefficient R_{ij} characterizes the influence of the variable i (welding parameter) on the quality indicator Y_k . As its value becomes higher, the higher becomes the influence of that parameter on welded joint quality. It is determined from the relation:

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_i)(Y_{ki} - \bar{Y}_k)}{\sqrt{S_{X_i} \cdot S_{Y_k}}}$$

where: $\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}$ and $\bar{Y}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_{kj}$

are the mean values of the variables, and

$$S_{X_i}^2 = \frac{1}{1-N} \sum_{j=1}^N \Delta X_{ij}^2 \text{ and } S_{Y_k}^2 = \frac{1}{1-N} \sum_{j=1}^N \Delta Y_{kj}^2$$

are dispersions of the variables

$$\Delta X_{ij} = X_{ij} - \bar{X}_i \text{ and } \Delta Y_{kj} = Y_{kj} - \bar{Y}_k$$

Since the quality of welded joints is influenced by deviations of welding parameters from optimal values, hence they are also used in the calculation of quality indicator and welding parameter correlations.

Test results from X60 steel welded joint samples, welded by SAW and HF welding, are used in the analysis. The selected welding parameters X_i are: mean values of current, voltage and welding speed in the above mentioned manufacturing process. Differences between two welding parameters from the above discussed welding processes are declared as allowable limits for deviations. Coefficients of welding parameters are given in the Table 10 and 11.

Tabela 11. Korelacija parametara zavarivanja i pokazatelja kvaliteta za VF postupak
Table 11. Influence of welding parameters in the HF process.

| Broj ispitanih uzoraka Number of tested samples | Parametri zavarivanja Welding parameters | | | Pokazatelji kvaliteta Quality indicators | Koeфицијent koleracija R_{ik} Coefficient of correlation R_{ik} | | |
|--|---|-------|-----------|---|--|-------|-------|
| | I (A) | U (V) | V (m/min) | | X_1 | X_2 | X_3 |
| 54 | 23.5 | 12.5 | 14 | Zatezna čvrstoća Tensile strength | 0.52 | 0.50 | 0.42 |
| | | | | Udarна žilavost Impact toughness | 0.67 | 0.66 | 0.22 |

Na osnovu rezultata proračuna zaključuje se da od razmatranih parametara zavarivanja najveći uticaj na zateznu čvrstoću i udarnu žilavost spiralno zavarenih cevi ima jačina struje, a zatim napon, dok najmanji uticaj ima brzina zavarivanja. Kada su u pitanju uzdužno zavarene cevi, na zateznu čvrstoću najviše utiče brzina zavarivanja, zatim napon, a najmanji uticaj ima jačina struje. Na udarnu žilavost najviše utiče jačina struje, zatim brzina zavarivanja, a najmanji uticaj ima napon.

Uočljivo je da su koeficijenti korelacije razmatranih parametara zavarivanja i udarne žilavosti veći od koeficijenta korelacije parametara zavarivanja i zatezne čvrstoće. To znači da odstupanja od optimalnih parametara zavarivanja imaju veći uticaj na udarnu žilavost zavarenog spoja nego na zateznu čvrstoću.

ZAKLJUČAK

Ispitivanjem udarne žilavosti stiče se slika otpornosti materijala na lom u različitim uslovima. Na osnovu rezultata može se istaći da je udarna žilavost kod epruveta normalno na šav, paralelno sa osom cevi i paralelno sa valjanjem, približno jednaka.

Upoređujući I i II proizvodni proces, a na osnovu rezultata, vidi se da je udarna žilavost kod epruveta normalno na šav veća kod II proizvodnog procesa i to: na 20°C za 1,19%, na 0°C za 10,62%, na -10°C za 16,75 %.

Upoređujući udarnu žilavost šavova, zavarenih EPP i VF postupcima, na osnovu rezultata se uočava da je udarna žilavost kod EPP postupka veća: na 20°C za 85,9%, na 0°C za 80,2%, na -20°C za 57,52% i na 40°C za 44,13%.

Kod epruveta zavarenih EPP postupkom, na 20°C udarna žilavost iznosi 153 J/cm². Sa smanjenjem temperature, udarna žilavost opada, tako da prelazna temperatura za čelik X60, zavaren EPP postupkom je, na -20°C (kriterijum 37 J/cm²). Konstatuje se da se cevi zavarene VF postupkom ne mogu upotrebiti za odgovorne cevovode.

Srednja vrednost udarne žilavosti zavarenog spoja materijala J55, zavarenog VF postupkom, na -40°C je 27,62 J/cm², na -20°C je 60,51 J/cm², na 0°C je 69,31 J/cm² i na 20°C je 80,13 J/cm².

Svi ovi rezultati pokazuju da VF postupak zavarivanja kod materijala X60 daje nižu žilavost i nižu otpornost na krti lom. U konkretnom slučaju kod VF zavarivanja je dobijena nedovoljna žilavost i nedovoljna otpornost na krti lom i zbog toga što osnovni materijal, zavaren VF postupkom, ima znatno manje deformacione karakteristike i plastičnost, a veću čvrstoću.

As based on calculated results, it is concluded that the current, followed by the voltage, have the highest influence on tensile strength and impact toughness of spiral seam welded tubes, amongst all of the welding parameters discussed, whilst welding speed has the least effect. Tensile strength of longitudinal seam welded tubes is mostly influenced by welding speed, followed by voltage, and electric current being the least influential. Impact toughness is mostly affected by current, welding speed, and voltage with the least influence.

It is obvious that correlation coefficients of discussed welding parameters and impact toughness are higher than coefficients of the welding parameters and tensile strength. Deviations from optimal welding parameters have a larger influence on the impact toughness of welded joints than on tensile strength.

CONCLUSION

Tests of impact toughness bring a clear picture of the materials' resistance to fracture in various conditions. Based on results, we can say that impact toughness values are almost identical for specimens perpendicular to welded joint, parallel to tube axis, and parallel to rolling direction.

Comparing results from the first and second manufacturing processes shows that impact toughness for specimens perpendicular to welded joint is higher in the second process: by 1.19% at 20°C, 10.62% at 0°C, and by 16.75% at -10°C.

Comparing welded joint impact toughness results for the SAW and HF welding processes, it is noticed that it has higher values for SAW: by 85.9% at 20°C, 80.2% at 0°C, 57.52% at -20°C, and by 44.13% at 40°C.

The impact toughness of SAW welded samples at 20°C is 153 J/cm². Toughness decreases with temperature, and so the transition temperature of SAW welded steel X60 is determined to be -20°C (criterion 37 J/cm²). Thus, HF welded tubes cannot be used for critical pipelines.

The mean values of impact toughness for HF welded joints of J55 are: 27.62 J/cm² (-40°C), 60.52 J/cm² (-20°C), 69.31 J/cm² at 0°C, and 80.13 J/cm² at 20°C.

All these results show that the HF welding procedure on X60 material results in lower values of toughness and lower resistance to brittle fracture. In the above case, HF welded tubes resulted in insufficient toughness values and poor resistance to brittle fracture, and also because the base metal, welded by HF process, has considerably lower strain characteristics and plasticity, but higher strength.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke za finansiranje rada na ovoj temi u okviru projekta br. 14014 „Istraživanje i razvoj metoda za ocenu integriteta i pouzdanosti zavarenih cevi u naftnoj industriji“.

LITERATURA – REFERENCES

1. Standardi API Std 5LS, API 5CT i ASTM A 370
2. Arsić, M., *Izbor čelika za izradu šavnih cevi*, Međunarodna konferencija „Zavarivanje 2001“, Beograd 2001, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 47, br.1, 2002, str. 33-37.
3. Arsić, M., Aleksić, V., Šarkočević, Ž., *Uticao parametara zavarivanja na tvrdoću zavarenih spojeva šavnih cevi od čelika povišene čvrstoće*, Procesna tehnika, br.1, 2002, str. 107-117.
4. Arsić, M., Šarkočević, Ž., Aleksić, V., Anđelković, Z., *Uticao parametara zavarivanja na kvalitet šavnih cevi*, Procesna tehnika, br.1 2004, str. 104-108.
5. Arsić, M., Šarkočević, Ž., Aleksić, V., Burzić, Z., *Uticao unete količine toplote pri zavarivanju na žilavost metala šava cevi izrađenih od čelika povišene čvrstoće*, Međunarodno savetovanje o dostignućima elektro i mašinske industrije „DEMI 2003“, Banja Luka, 2003, str. 159-164.
6. Arsić, M., Nikolić, M., Ćirković, B., Aković, R., *Analiza kvaliteta zavarenih spojeva u procesu proizvodnje zavarenih cevi*, Međunarodno savetovanje Zavarivanje '94 „Aktuelni trendovi u zavarivanju i srodnim postupcima“, Novi Sad, 1994, 129-132.
7. Sarvan, M., Arsić, M., *Kontrola zavarenih spojeva metodom jednostrukog izbora*, Međunarodno savetovanje „Zavarivanje '96“, Beograd 1996, str. 248-251.
8. Šarkočević, Ž., Sedmak, A., Arsić, M., Aleksić, V., Zrilić, M., *Kontrola i ispitivanje zavarenih spojeva šavnih cevi od čelika povišene čvrstoće*, Savetovanje „IBR 2000–Standardizacija, obrazovanje, sertifikacija, praksa i razvoj“, Zlatibor 2000, str. 67-71.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support from the Serbian Ministry of Science, under project number 14014 “Research and development of a method for structural integrity assessment and reliability of welded tubes in the oil industry”.

9. Šarkočević, Ž., *Analiza uticaja grešaka u zavarenim spojevima na ponašanje šavnih cevi povišene čvrstoće*, magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999.
10. Arsić, M., Nikolić, M., Mišić, M., Ćirković, B., *Eksperimentalna analiza ponašanja zavarenih spojeva na cevima izrađenim od čelika povišene čvrstoće*, Međunarodno savetovanje Zavarivanje '94 „Aktuelni trendovi u zavarivanju i srodnim postupcima“, Novi Sad 1994, str. 131-137.
11. Šarkočević, Ž., Sedmak, A., Arsić, M., Milovanović, A., Aleksić, V., *Mehanička ispitivanja zavarenih spojeva šavnih cevi*, Procesna tehnika, br.1, 2001, str. 134-137.
12. Zrilić, M., Rakin, M., Sedmak, A., Aleksić, R., Cvijović, Z., Arsić, M., *Ductile Fracture Prediction of Steam Pipeline Steel*, Materials Science Forum, Vol.518 (2006), pp. 537-542.
13. Aleksić, V., Arsić, M., Sedmak, A., *Procena čvrstoće zavarenih spojeva na tankim cilindričnim ljuskama oslabljenim aksijalnom prslinom, modifikovanom REI metodom*, Procesna tehnika, br. 1, 2002, str. 123-126.
14. Aleksić, V., Sedmak, A., Arsić, M., *Procena integriteta zavarenih spojeva procedurom JWES 2805*, VII Međunarodni naučno-stručni skup o dostignućima elektro i mašinske industrije „DEMI 2005“, Banja Luka 2005, str. 35-40.
15. Aleksić, V., Arsić, M., Šarkočević, Ž., *Oštećenja i posledice korozije metala u prednapregnutim betonskim konstrukcijama*, Konferencija sa međunarodnim učešćem, SITZAMS „Interdisciplinarni pristup problematici zaštite konstrukcionih materijala“, Tara 2005, str. 186-190.
16. Arsić, M., Aleksić, V., Šarkočević, Ž., *Pokazatelji kvaliteta šavnih cevi*, Savetovanje sa međunarodnim učešćem „IBR 2002“, Tara 2002, str. 37-43.