

KVALITET ZAVARENIH KONSTRUKCIJA - VLASTITE SPOZNAJE

QUALITY OF THE WELDING CONSTRUCTIONS - OWNSELF REMARKS

**Prof.dr. Nedžad Repčić, dipl.ing., Mašinski fakultet Sarajevo, Vilsonovo 9,
071/ 65 31 92, e-mail: nrepcic @utic.net.ba**

REZIME:

Uslovi i uticaji za postizanje kvaliteta zavarenih spojeva odnose se na osnovne uticaje (jačina osnovnog materijala, vrsta šavova, vrsta opterećenja) i tehnološke uticaje (sastav i kvalitet osnovnog i dodatnog materijala, priprema dijelova za zavarivanje, izvođenje zavarivanja, kontrola zavarivanja).Pri određivanju kvaliteta zavarenih spojeva treba voditi računa da ona nije podjednako važna i bitna za sve vrste spojeva i opterećenja i za sve dijelove konstrukcije. Iz tih razloga utvrđeno je da se propisuje više stepena kvaliteta zavarenih spojeva.Na taj način omogućeno je da se propiše onaj kvalitet zavarenih spojeva koji je tehnički potreban, a istovremeno ekonomski opravdan.

Ključne riječi: Kvalitet, zavareni spojevi, smjernice

SUMMARY:

This paper aims of welded joints in metals, covering examination of a large variety of materials, products and structures both during manufacture and in service.You will find a number of helpful how-to articles, glossary of terms, and troubleshooting grids available for your use. It reinforces the welder's understanding of procedures with material on heat input and distribution, essentials of shielded metal-arc technology, distortion, welding defects, welding safety, essentials of welding metallurgy, and qualification of the welding procedure and the welder. The paper describes the technology and manipulative procedures for making successful welds in all welding positions and the types of joints and metals. It also offers many of hints on how to solve every on-the-job welding problem.

Key words: Quality, welded joints, guidelines

1.UVOD

Zavarene konstrukcije su danas našle široku primjenu u svim oblastima metalne industrije, a ovakva ekspanzija je rezultat spoznaje da je zavarivanje najekonomičniji način spajanja metala. U konstruktivnom smislu dvije su značajke procesa zavarivanja bitno promjenile koncept konstruisanja a to su: ušteda materijala i obezbjeđenje materijalnog kontinuiteta. Osim toga zavarivanje se može primjeniti za sve konstruktivne metale, što konstruktorima pruža velike mogućnosti pri modeliranju mašinskih konstrukcija općenito.Međutim, zavarivanje ima i stanovite nedostatke koji se moraju uvažiti, a odnose se na postojanje strukturnih nehomogenosti, prisustvo grešaka

materijalne homogenosti, prisustvo unutrašnjih napona i uticaj zavarivača na kvalitet zavara.Kv

Kvalitet i pouzdanost neke zavarene konstrukcije pored niza drugih faktora zavisi i od postojanja tehničke regulative, te poštovanje iste. Tehnička regulativa rješava mnoge odnose na relaciji proizvođač-naručilac, uklanja prepreke pri međunarodnoj razmjeni, ali i u racionalnom korištenju naučnih i tehnoloških dostignuća. U tehnici zavarivanja tehnička regulativa odnosi se na oblasti projektovanja, proračuna i konstruisanja, sredstava rada, tehnologiju izrade, zavarivački kadar, zaštitu pri radu, načine kontrole i kvalitet zavarenih spojeva itd. Kod zavarenih spojeva za noseće čelične konstrukcije, odnosno za dijelove konstrukcija najbitniji elementi su kvalitet materijala, oblik šava, način naprezanja spoja i kvalitet izrade zavarenog spoja. Iz tih razloga pri oblikovanju zavarenih konstrukcija treba voditi računa o nizu specifikacija, standarda, zakona, pravilnika, uputstava, odredaba i propisa kojima podliježu zavarene konstrukcije, i svaki konstruktor trebao bi stoga svoje projekte savjesno i kritički ispitati da li su između ostalog zavarivački pravilno oblikovani, jer to direktno utiče na kvalitet zavarene konstrukcije.

Najčešće korišteni oblici tehničke regulative u zavarivanju su standardi i to međunarodni (ISO – T4 / 44 - područje zavarivanja i ima ih oko stotinu, ISO 3834 - 2,3,4 – zahtjevi kvaliteta pri zavarivanju, EN 287-1,2 – atestacija zavarivača putem šifre, EN 45000 – akreditovane laboratorije za atestaciju zavarivača, EN25817, EN30042 – greške u zavarenim spojevima), zatim nacionalni standardi (DIN, ASTM, BS, HN) i standardi velikih kompanija, osiguravajućih zavoda i slično. Evropska ekonomska zajednica je uspostavila Evropski komitet za standardizaciju – CEN, međutim sve evropske norme EN iz oblasti zavarivanja nisu još dovršene, a očekuje se oko tri stotine stavki.

Tehnički propisi za zavarene čelične konstrukcije kod nosećih čeličnih konstrukcija, zajedno sa ostalim tehničkim propisima za noseće čelične konstrukcije, imaju izuzetno veliku i važnu primjenu u svim fazama realizacije investicionih programa. Njihova primjena je podjednako značajna kako za projektanta-statičara tako i za investitora, nadzornog organa i ovlašćenih organizacija koje vrše tehnički prijem objekata. Striktnom primjenom ovih propisa obezbjeđuje se, prije svega bezbjednost objekata tj. nosećih čeličnih konstrukcija, ušteta u materijalu, vremenu izrade konstrukcije, te njenoj adekvatnoj eksploataciji. Prilikom vođenja nadzora, montaže i tehničkih prijema zavarenih čeličnih konstrukcija, obavezno se mora pridržavati tehničkog izvještaja tj obrazloženja konstruktora - statičara i svih drugih propisa i standarda.

2. STRUKTURNA RAZMATRANJA DIZAJNIRANJA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA

Sve faze savremenog dizajniranja zavarenih konstrukcija predstavljaju misaone procese, pri čemu faze definisanja funkcija, principa njihovih ostvarivanja i realizacije usvojenih rješenja imaju izrazito kreativni karakter. Poseban segment predstavlja kvalitet zavarenih spojeva i kontrola kvaliteta. U tom cilju obrazuje se lista zahtjeva i graničnih uslova kojima se utvrđuju svojstva koja treba da posjeduje zavarena konstrukcija i njeni dijelovi, i granice područja u kojima se mogu nalaziti pokazatelji svojstava konstrukcije.

To se prvenstveno odnosi na radni učinak zavarene konstrukcije, područja spoljnih mjera i ukupne mase, kinematske i dinamičke veličine, sigurnost i pouzdanost konstrukcije i njenih elemenata kao i zavarenih sastavaka, posebne zakonske propise u pogledu provjere npr. čvrstoće i kvaliteta zavarenih spojeva, zatim obima automatizacije kontrole i upravljanja konstrukcijom, ergonomske uslovi, hemijsko tehnička zaštita pa i estetski izgled. Pored toga u listi zahtjeva i graničnih uslova zavarene konstrukcije određuje se vrsta i područje veličine potrebne energije, zatim vrsta i svojstva radnog materijala, posebni propisi u pogledu obrade i zavarivosti materijala, kao i obim primjene standardnih, unificiranih i tipiziranih dijelova i komponenata.

Tehnološki uslovi jedne zavarene konstrukcije su određeni postupkom izrade, kvalitetom površina, kvalitetom tolerancija mjera i oblika, mogućnosti kontrole, složenosti alata i pribora, montaže i transporta (npr. velikih rezervoara), stepena obučeniosti svih učesnika u proizvodnji a time i samih zavarivača, kao i ograničenjima u troškovima izrade, veličine troškova materijala, alata i dijela vrijednosti proizvodnih sredstava. Važan graničan uslov u listi zahtjeva predstavljaju i rokovi odnosno vrijeme potrebno za izradu projekta i razvoj zavarene konstrukcije. Stepenn ispunjenja navedenih zahtjeva i predviđenih značajki pojedinih svojstava i uslova predstavlja osnovni kriterijum za ocjenu valjanosti i kvaliteta zavarene konstrukcije.

Završna faza nastaje poslije eksperimentalnih ispitivanja zavarene konstrukcije u cjelini, odnosno kontrola kvaliteta zavarenih mjesta, nakon čega se radi završna projektna dokumentacija koja treba da sadrži sve izvršene proračune, šeme, crteže sklopova i detalja, uputstva za korištenje, upravljanje i održavanje zavarene konstrukcije. Međutim, za uspješan stvaralački rad pri oblikovanju zavarene konstrukcije neophodno je dobro poznavanje svih fizičkih i fizičko-hemijskih pojava, procesa i zakonitosti, kao i tehničkih normativa prilagođenih savremenim kretanjima u ovoj oblasti.

Primjena računara u oblikovanju zavarene konstrukcije je danas neophodna, kako za sve vrste proračuna i za grafičko prikazivanje rezultata rada, tako i za upravljanje kvalitetom zavarenih spojeva odnosno kod defektoskopije. Sa druge strane primjena računara je direktno povezana i sa automatizacijom procesa zavarivanja, koja je danas praktično nezaobilazna ukoliko se želi postići visok kvalitet zavarenog spoja. Isto tako primjena računara omogućuje brzo i tačno izračunavanje vrlo složenih procesa zavarivanja sa velikim brojem uticajnih faktora, određivanje vrlo složenih i promjenljivih stanja materijala i dijelova sistema u toku rada, naponskih, dinamičkih, toplotnih i slično. Osim toga omogućuju i primjenu novih metoda proračuna zavarenih spojeva (npr. FEM aplikacije za određivanje naponskih, toplotnih i drugih stanja), kao i za iteraciju prilikom optimiranja neke zavarene konstrukcije.

Široku primjenu postupaka spajanja zavarivanjem u mnogim oblastima mašingradnje omogućila je ekonomičnost konstrukcije od standardnih profila i limova. Zavarene konstrukcije se mogu svrstavati u različite grupacije kao što su noseći elementi konstrukcija (npr. rešetke), dijelovi od lima (npr. rezervoari) i zavareni elementi mašina (npr. postolja mašina). Od grupacije zavisi direktno i kvalitet zavarenih spojeva, ali i mogućnost primjene određenih tehničkih propisa. Sa druge strane zavarivost materijala je slijedeća bitna odrednica kvaliteta zavarene konstrukcije. Niskougljenični čelici imaju dobru zavarivost (oko 0,3% C), dok čelici sa većim sadržajem ugljenika i legirani čelici zavaruju se uz posebnu pripremu. Bakar, mesing, bronza, cink i aluminijum mogu se također zavarivati pod određenim uslovima. I dijelovi od termoplastičnih vještačkih masa mogu se međusobno zavarivati (npr. tvrdi i mekani polivinil hloridi).

Cilj zavarenih spojeva dobivenih topljenjem (gasno zavarivanje, elektrolučno itd.) je homogena masa šava sastavljena od osnovnog i dodatnog materijala. Međutim, kvalitet zavarenih spojeva topljenjem često ima širok spektar, jer je to složen termohemijski proces u kojem se rastapa osnovni i dodatni materijal, sagorjevaju neki sastojci dodatnog i osnovnog materijala i sredstava zaštite i po pravilu, zavareni spoj je najslabiji u zoni uticaja toplote. Izborom pogodnog postupka zavarivanja sa zaštitom spoja od sagorjevanja, od brzog hlađenja, predgrijavanjem i slično, struktura zone oko šava može biti manje promjenjena u odnosu na osnovni materijal. Proces zavarivanja je složen proces i podložan nizu uticaja, te se mogu dobiti šavovi sa značajnim metalurškim greškama, kao što su mikro i makro pukotine, šupljine, uključci, nevezanost nanijetog materijala sa osnovnim, nedostaci provara, greške profila šava itd. Zavisno od uslova pod kojima se spoj ostvaruje i od veličine dozvoljenih grešaka, utvrđeni su određeni stepeni odnosno klase kvaliteta zavarenih spojeva. Ostvareni kvalitet odnosno greške lica i naličja šava i greške u unutrašnjosti šava otkrivaju se raznim metodama defektoskopije (radiografija, ultrazvuk, magnetne metode itd.). Radi postizanja

što višeg kvaliteta, odnosno ostvarivanja homogenog spoja i veće produktivnosti, zavarivanje se uglavnom vrši automatskim postupcima. Ručni postupci se koriste pri montaži, pri spajanju manjih dijelova i u drugim slučajevima, u kojima je primjena automatskih postupaka otežana. Kvalitet ručno zavarenih spojeva poboljšava se atestiranjem i kontrolom rada zavarivača. Zagrijavanje pri zavarivanju i širenje metala je lokalno, što dovodi do termoplastičnih deformacija u ovoj zoni. Poslije hlađenja, odnosno skupljanja u spojevima nastaju zaostali naponi i deformacije usljed zavarivanja. Primjenom odgovarajućih načina postavljanja dijelova, redoslijeda zavarivanja, predgrijavanja i slično, veličine deformacija i zaostalih napona mogu se znatno umanjiti.

Zaostali naponi i neke metalurške greške mogu se otkloniti različitim termičkim i mehaničkim postupcima, kao što su plastične deformacije u toplom ili u hladnom stanju, žarenje, otpuštanje itd. Raspodjela napona u zavarenom spoju je dosta složena. Lokalnim zagrijavanjem u toku zavarivanja i hlađenjem poslije zavarivanja ostvaruje se prethodno naponsko stanje, dok zavareni spoj svojim oblikom može izazvati značajnu koncentraciju napona. Posebno složeno naponsko stanje je u ugaonim šavovima, jer je neravnomjerna i različita raspodjela normalnih i tangencijalnih napona u svakom od pravaca iz korijena šava. Naponsko stanje je manje složeno kod sučeonih spojeva, a ako su neobrađeni predstavljaju izvor koncentracije napona.

Proračun zavarenih spojeva na bazi tačno utvrđene raspodjele napona u šavu je teško primjenljiv. Ako za to postoji ekonomsko opravdanje, primjenjuju se numeričke metode utvrđivanja veličine i raspodjele napona u šavu. U suprotnom, primjenjuje se proračun na osnovu prosječnog tj. nominalnog napona, dok se uticaj neravnomjernosti raspodjele napona, ali i ostali uticaji uzimaju preko korekcionih faktora. Smatra se da je u ugaonim šavovima koncentracija grešaka najveća u ivičnoj zoni. Za provjeru i dimenzionisanje statički napregnutih zavarenih spojeva kao i konstrukcija izloženih promjenljivom opterećenju sa malim brojem promjena napona ili ako je amplituda promjene mala u odnosu na srednju vrijednost, mjerodavna je granica tečenja zavarenog spoja.

Dinamička izdržljivost zavarenih spojeva utvrđuje se ispitivanjem na zamor zavarenih epruveta i dijelova. Smanjenje u odnosu na izdržljivost osnovnog materijala srazmjerno je uticaju oblika spoja i kvaliteta šava. Faktor uticaja oblika spoja na izdržljivost obuhvata uticaj koncentracije napona ostvarene samim spojem, i za sučeone spojeve je blizak jedinici, a za ugaone i preklopne spojeve je znatno manji. Ispupčeno tjeme vara, odnosno nagomilavanje dodatnog materijala doprinosi uvećanju koncentracije napona i smanjenju izdržljivosti spoja. Također je nepovoljno predvidjeti zavareni spoj u zoni koncentracije napona, npr. promjene presjeka, otvori i slično. Kvalitet šava znatnije utiče na dinamičku izdržljivost nego na statičku čvrstoću zavarenog spoja. Da uključci, poroznost i slična dozvoljena odstupanja u kvalitetu šava ne bi prerasla u prskotinu ili da bi se širenje eventualnih prslina zaustavilo, izdržljivost zavarenih spojeva se smanjuje faktorom uticaja kvaliteta šava. Stepenn sigurnosti zavarenog spoja treba biti od 1,25 do 1,5 (2,5), pod pretpostavkom da su svi navedeni uticaji dovoljno tačno obuhvaćeni.

Pukotine u zavarenim spojevima nisu dozvoljene, međutim ova mogućnost pri izradi šava ili u toku rada spoja nije isključena. Rast pukotine do kritične veličine može biti relativno dugotrajan, jer kod žilavih materijala od ukupnog broja promjena napona do loma veći dio se odnosi na širenje pukotine. Primjenom teorije iz mehanike loma o razvoju pukotine može se za neke materijale izračunati broj promjena napona od pojave pukotine do razaranja spoja. Čvrstoća zavarenih spojeva na niskim temperaturama može se održati ako se obezbijede uslovi da prelazak u krto stanje bude na što nižoj temperaturi i popravi kvalitet zone uticaja toplote.

To se može postići primjenom materijala sa nižim temperaturama prelaska u krto stanje i materijala sa visokom otpornošću ka širenju pukotine, normalizacijom poslije zavarivanja ili kaljenjem sa otpuštanjem smanjuje se nepovoljan uticaj toplote na okolinu šava, poboljšava kvalitet osnovnog materijala i smanjuju zaostali naponi (ako je temperatura otpuštanja za dati materijal neodgovarajuća, mogu se postići suprotni efekti),

otpuštanjem poslije zavarivanja otklanjaju se zaostali naponi i obnavljaju plastična svojstva u zoni uticaja toplote. Manji zaostali naponi i manja koncentracija napona povoljno utiču na čvrstoću na niskoj temperaturi.

Oblici izrađeni zavarivanjem u pogledu kvaliteta dakle, zavise od sposobnosti i savjesti varioca, od izabrane elektrode ili dodatnog materijala, od položaja zavarenog sastavka, od pojave zaostalih napona, deformacija i pukotina u izvjesnim prilikama, od podobnosti materijala za zavarivanje, od postupka zavarivanja i pripreme za zavarivanje, ali i od obaveze da će zavareno mjesto biti kontrolisano i ispitano od strane ovlaštenog lica ili ustanove.

Zbog zagrijavanja pri zavarivanju i naknadnog hlađenja pojavljuju se u zavarenim sastavcima zaostali naponi i trajne deformacije, koje se manifestuju i u promjenama mjera i u promjenama oblika, a to je direktno vezano za kvalitet zavarene konstrukcije. Po pravilu, slojevi materijala koji se najkasnije ohlade izloženi su naponu zatezanja.

3. PREPORUKE O KVALITETU ZAVARENIH SPOJEVA SA KONSTRUKTIVNE TAČKE

Ima niz preporuka za ublažavanje i deformacija i zaostalih napona:

- Najbolje i najlakše se zavaruju horizontalni varovi, zatim vertikalni, a najnepovoljniji su zavareni spojevi iznad glave koje konstruktor treba izbjegavati. Sastavak unutar konstrukcije treba također izbjegavati jer je otežano rukovanje procesom zavarivanja,
- Povoljniji su kraći sastavci sa varovima male mase, jer je tada lokalno zagrijavanje limova slabije, što znači da treba obratiti pažnju na ispravnu pripremu limova sa propisanim uglom i na ispravan položaj limova pri zavarivanju,
- Deformacije se djelimično ublažuju ako se radi o čeonim sastavcima sa varovima simetričnog presjeka ili dvostranim ugaonim sastavcima,
- Nagomilavanje odnosno ukrštanje zavarenih spojeva je vrlo nepovoljno jer se pojavljuje jaka koncentracija napona koja može izazvati pukotine, ali i prelome usljed zamora pri jačim promjenljivim naprezanjima. Što se više zavara sastaje u jednoj tački i što su deblji zavari, time je jače izvitoperenje. Prema iskustvu, nastale deformacije rastu ovim redoslijedom: elektrootporno, elektrolučno, gasno zavarivanje. Npr. uzdužni sastavci susjednih sekcija rezervoara ili kotlova ne treba da leže u istom pravcu,
- Ukoliko se radi o zavarivanju debljih limova tada je povoljnije zavarivanje sastavka izvesti nanošenjem više tanjih slojeva vara,
- Kod zavarenih konstrukcija vrlo je bitan redoslijed kojim se var izvodi, jer najnepovoljnije je kada se sastavak zavaruje u jednom potezu od početka do kraja. Najpovoljnije je kada se var nanosi naizmjenično na razna mjesta sastavka sa preskokom, jer je tada lokalno zagrijavanje limova slabije,
- Položaj limova prije zavarivanja potrebno je u cilju podizanja kvaliteta zavarene konstrukcije ispitati eksperimentalno. Ovo znači da zavarivanjem limova u položaju koji je suprotan očekivanoj deformaciji može povoljno uticati na ravnost sastavka,
- Naknadnim zagrijavanjem (npr. žarenjem) mogu se znatno ublažiti zaostali naponi,
- Zavarivanje prethodno zagrijanih mašinskih dijelova doprinosi boljem kvalitetu vara, ali to je nekada skupo ili nepodesno,
- Lokalno zagrijavanje pojedinih mjesta zavarenog sastavka je jedna od metoda za ispravljanje zavarenih oblika, a koristi se i mehaničko djelovanje na sastavak u hladnom ili toplom stanju u cilju ispravljanja zavarenog oblika,
- U cilju smanjenja zaostalih napona nekada se sastavak mehanički opterećuje,
- Vrsta sastavka bira se zavisno od debljine limova, od pristupačnosti sa jedne ili sa obje strane, od vrste naprezanja, a bolji je čeon var od ugaonog ili preklopnog. Var

- ima “urođenu” koncentraciju napona, pa kada joj se pridruži i koncentracija napona zbog oblika, može promjenljivo naprezanje izazvati pad dinamičke izdržljivosti vara,
- Kada su u pitanju jača promjenljiva naprezanja, treba obavezno predvidjeti zavarivanje korijena, pa čak i posebnu obradu tjemena vara (brušenje), jer se tako ublažava koncentracija napona i povećava dinamička izdržljivost sastavka. Ispupčeni varovi izazivaju jaku koncentraciju napona,
 - Razumnim izborom oblika mogu se smanjiti količine otpadaka materijala prilikom isjecanja lima, a prilikom zavarivanja cjevnih vodova potrebno je izvršiti naročitu pripremu cijevi da bi se smanjili otpori proticanju fluida. Izbjegavati skupe pripreme radove, jer radovi oko krojenja i obrada rezanjem poskupljuju konstrukciju. Međutim, savijanjem i pregibanjem rubova sastavnih dijelova mogu se uštedjeti zavareni šavovi,
 - Pri konstruisanju zavarenih konstrukcija, konstruktor ne smije koristiti analogiju sa livenom ili zakovanom konstrukcijom, jer polazni elementi za izradu zavarenih konstrukcija nameću sasvim drugačiju koncepciju, a oblici općenito moraju biti u skladu sa predviđenim tehnološkim procesom,
 - Izbjegavati zarezno djelovanje, jer loš spoj osnovnog i dodatnog materijala prouzrokuje velika zarezna djelovanja tj. vršna naprezanja u korijenu, što pri dinamičkom opterećenju može dovesti do loma zbog zamora materijala. Kod dinamički opterećenih šavova zavaruje se posebno korijen, ili se to izvodi u obliku X – zavara. Nejednolično ili valovito vučeni zavari djeluju također kao zarezi. Obrada nadvišenja ili raskivanje smanjuju vršna naprezanja. Na početku i kraju zavara stvaraju se krateri, koji također izazivaju vršna naprezanja. Glodanjem tih krajeva zavara mogu se ublažiti vršna naprezanja,
 - Izbjegavati naprezanje na istezanje u korijenu zavara, jer je korijen izuzetno osjetljiv na zatezno naprezanje i treba ga postaviti u zonu napona pritiska,
 - Za čvrstoću zavara od presudnog je značaja tok sila. Skretanja u zoni zavarivanja izazivaju vršna naprezanja i pri promjenljivom opterećenju materijal biva brže razoren. Zato je čeonu zavaru dinamički izdržljiviji nego ugaoni, jer u čeonom varu nema skretanja toka sila,
 - Dati prednost poluproizvodima, jer zavareni dio postaje jeftiniji ako se upotrebe poluproizvodi kao što su plosnati i profilni čelici, cijevi, skošeni ili savijeni limovi itd.,
 - U visokogradnji, gradnji dizalica i gradnji mostova profilni čelici, plosnate šipke, cijevi i limovi spajaju se u nosive konstrukcije, rešetkaste konstrukcije ili limene nosače, npr. krovne nosače, čelične konstrukcije tvorničkih hala, nosače vozniha naprava dizalice i slično. Pri ovome treba znati da npr. kod nosača rešetkaste konstrukcije njegovi vanjski štapovi (pojasevi) se ukružuju vertikalnim i dijagonalnim štapovima i u čvoru se uvijek sastaje više štapova. Puni nosači izvode se kao limeni nosači ili kao sandučasti nosači, a da se ne bi izbočili, na određenim razmacima uvaruju se ukrućenja. Minimalna debljina nosivih dijelova od čelika iznosi kod male opasnosti od korozije 4mm, kod dizalica 3mm, kod čvornih limova 4mm, kod cijevi 2mm. Za srednje ili veće opasnosti od korozije propisane su veće minimalne debljine. Težišnice štapova trebaju se po mogućnosti podudarati sa linijama sistema. Zavareni sastavni dijelovi moraju biti tako oblikovani da se koliko je moguće postigne nesmetan tok sila, a treba izbjegavati nepovoljne prelaze sa jednog presjeka na drugi i veće proreze ili provrte u blizini zavarenih ili navarenih limova. Za zavarivanje topljenjem smiju se upotrebiti samo čelici sa garantovanom sposobnosti za takva zavarivanja, npr. Č.0361, Č.0562 itd.,
 - U mašinogradnji se izrađuju u zavarenoj izvedbi dijelovi kao što su npr. zupčanici, remenice, kućišta prenosnika, ležajna postolja, konzole itd. U zavarenim šavovima u ovom slučaju vrijede slična pravila u računanju naprezanja kao kod čeličnih konstrukcija,
 - Zavareni šavovi na kotlovima i posudama pod pritiskom moraju biti apsolutno nepropusni i vrlo čvrsti, pa stoga iziskuju pažljivu izradu. Zavarivanja na stabilnim i

brodskim kotlovima dopuštena su samo ako se dokaže da se upotrebljavaju dobro zavarivi materijali i da zavari računski zadovoljavaju propisima. Rezervoari i posude pretežno su izrađeni od limova i cijevi, a dimenzije pojedinih plašteva zavise o širini limova koji se mogu isporučiti, i postojećim mogućnostima proizvodnje. Da bi se spriječilo gomilanje šavova, treba uzdužne šavove pojedinih plašteva zaokrenuti jedan prema drugom. Veći otvori za nastavke, ulazni otvori (manhofi) i slično pojačavaju se grebenima, prirubnicama i slično,

- Cilj automatizacije i robotizacije kod zavarivanja je humanizacija procesa, podizanje kvaliteta zavarenih spojeva, efikasnost procesa zavarivanja. Međutim, automatizacija i robotizacija nije opravdana u svim slučajevima i za sve vrste zavarenih spojeva, a nekada nije ni moguća. Iz tih razloga mora se voditi računa o pravilnoj konstrukciji proizvoda, o veličini serije, stepena važnosti konstrukcije, postavljenih tolerancija itd. Postoji više stepeni automatizacije na potezu ručno zavarivanje – robot: poluautomatsko zavarivanje (npr. MIG postupak), mehanizovano zavarivanje (gorionik ili radni predmet se kreće po jednoj koordinati), automatsko zavarivanje sa automatskim stezanjem i pozicioniranjem zavarivanog elementa, automatsko zavarivanje sa samoprogramiranjem i povratnim informacijama za kontrolu parametara i konačno robot za zavarivanje. Kod automatskog gasnog zavarivanja upotrebljavaju se jaki višeplameni gorionici sa vodenim hlađenjem. Prema specifičnosti proizvoda koriste se sistemi automatskih zavarivanja sa kretanjem gorionika u odnosu na predmet, ili predmeta u odnosu na gorionik. Gasna smješa je obično obogaćena kiseonikom radi osiguranja maksimalne temperature plamena. Automatizacija elektrolučnog zavarivanja dostigla je danas takav nivo, da se može konstatovati da je automatizovano elektrolučno zavarivanje najprogresivniji tehnološki proces spajanja materijala. Postoje dva tipa automata za elektrolučno zavarivanje i to sa regulisanjem električnih karakteristika luka i automati postojane brzine dodavanja elektrode. Zavarivački roboti imaju veliku prednost nad automatskim zavarivačkim mašinama zbog znatno povećane fleksibilnosti. Svaki industrijski robot pored dva osnovna dijela upravljačkog i izvršnog ima i kontrolni sistem. Kontrolni sistemi u zavarivanju služe najviše za kontrolu temperature predgrijavanja osnovnog materijala, energetskog izvora, manipulacije procesom ali i za adaptivnu kontrolu procesa tj. povratne signale iz područja zavarivanja u cilju automatske ispravke grešaka. Danas za razvoj robotizacije i upravljanja procesom zavarivanja vrlo je bitan razvoj senzora (senzorika), dok savremeni pristup gradnji robotskih sistema je tzv. koncept modularne gradnje. Tu se za svaki vid kretanja izgrađuju posebni, unificirani moduli, čijom se montažom mogu sastavljati različiti robotski sistemi, različitih funkcija npr. isti robotski sistem može da vrši obradu, montažu, zavarivanje, naknadnu mehaničku i termičku obradu itd.

4. DODATNE INFORMACIJE O KVALITETU ZAVARENIH KONSTRUKCIJA

Zavarene čelične konstrukcije moraju se izvoditi po međunarodnim tehničkim propisima i normama, ukoliko se želi postići kvalitet koji je prihvatljiv na svim tržištima. Tehnički propisi o kvalitetu zavarenih spojeva za noseće čelične konstrukcije obično sadržavaju niz smjernica, ograničenja i uputstava, a ovi propisi su neposredno vezani za propise o osnovnom i dodatnom materijalu i tehnici zavarivanja, zatim sa opštim tehničkim propisima za izradu predmeta i konstrukcija zavarivanjem, kao i sa klasifikacijom grešaka u zavaru kao i za standarde za radiografiju.

Dakle, namjena ovih propisa je da se postigne odgovarajući kvalitet zavarenih spojeva i da se održava na potrebnoj visini. Kako visina kvaliteta nije podjednako važna i presudna za sve vrste spojeva i opterećenja i za sve dijelove čeličnih konstrukcija, utvrđivanjem više stepena kvaliteta zavarenih spojeva, omogućeno je da se propiše onaj kvalitet koji je tehnički potreban i ekonomski opravdan. Osnovni cilj ovih propisa je da odrede stepene

kvaliteta zavarenih spojeva za upotrebu pri projektovanju, izvođenju, kontroli i preuzimanju zavarenih konstrukcija. Uz do sada navedene smjernice kojih se treba pridržavati pri dizajniranju zavarenih konstrukcija, a u cilju postizanja potrebnog kvaliteta, potrebno je voditi računa i o slijedećem:

- S obzirom na stepen jačine i žilavosti osnovnog i dodatnog materijala, a gdje su moguće mnogobrojne kombinacije, treba se pridržavati pravila da šav mora da ima stvarno nešto bolje ili bar jednake mehaničke osobine nego osnovni materijal. To važi za granicu razvlačenja, jačinu, izduženje i žilavost. Obično treba tražiti bolju žilavost šava nego osnovnog materijala, jer je vjerovatnije da će se u šavu pojaviti greške i time smanjiti sigurnost protiv krtog loma,
- Po pravilu, treba nastojati da se obezbjedi nesmetan tok sila kroz zavareni spoj, naročito kod dinamički opterećenih dijelova konstrukcije. Spojevi sa ugaonim šavovima mnogo su osjetljiviji na vrstu i pravac opterećenja nego sučeonni spojevi, jer kod ugaonih šavova lokalne koncentracije napona su presudne za nosivost spoja, naročito pri zamoru. Ipak, u izvjesnim primjerima ugaoni šavovi mogu da budu opravdani s obzirom na olakšanu pripremu dijelova za zavarivanje i sastavljanje. Na kvalitet ugaonih šavova može da se utiče pažljivim zavarivanjem i izborom kvalitetnih elektroda,
- S obzirom na način naprezanja, treba razlikovati spojeve opterećene zatezanjem, smicanjem i pritiskom i to statički i dinamički (udar i zamor). Najkvalitetnije treba da budu izvedeni zavareni spojevi koji su dinamički opterećeni zatezanjem, a najmanji zahtjevi postavljaju se za spojeve koji su statički opterećeni pritiskom. Za konstrukcije ili dijelove konstrukcija sa vanrednim uslovima opterećenja i dejstva okoline, pojedini zahtjevi kvaliteta zavarenih spojeva mogu se modificirati i propisati u tehničkoj dokumentaciji kao posebni tehnički uslovi,
- Greške koje se otkrivaju kontrolom bez razaranja (radiografska kontrola, kontrola ultrazvukom i slično), definisane su posebnim standardima. Greške su mjesta u zavarenom spoju i okolnoj zoni uticaja toplote na kojima je došlo do odstupanja osobina od nekog unaprijed definisanog kriterija. Ova odstupanja se odnose na odstupanje oblika i dimenzija, odstupanje homogenosti šava i zone uticaja toplote i odstupanje mehaničkih i metalurških osobina u području šava i zoni uticaja toplote. Općenito, greške se dijele prema veličini pojedinačne greške i prema koncentraciji grešaka. Prema veličini pojedinačne greške one mogu biti "sitne greške" (veličina ne prelazi 5% od debljine šava, a nisu veće od 3mm), "male greške" (veličina od 5% do 15% od debljine šava, a nisu veće od 6mm), "srednje greške" (veličina od 15% do 30% od debljine šava, a nisu veće od 9mm), "velike greške" su greške čija je veličina veća od veličine "srednje greške". Prema koncentraciji grešaka u šavu, greške mogu biti pojedinačne greške, učestale greške i gnijezda grešaka. Greške mogu promijeniti hermetičnost, čvrstoću ili neka druga eksploataciona svojstva zavarene konstrukcije, a greške se mogu podijeliti i po svom položaju i po uzročnicima koji ih izazivaju. U zavisnosti od uzroka greške mogu biti dvojake i to: greške vezane za metalurške, termičke i druge pojave koje prate proces topljenja i kristalizacije (npr. pukotine, poroznost, troska itd.) i greške kod formiranja šava (zarezi, neprovarena mjesta, progorjevanje, krateri itd.). Prema najnovijim evropskim normama EN25817, EN30042 greške u zavarenim spojevima čelika i aluminijuma podjeljene su u šest osnovnih grupa i to: pukotine, gasni uključci, čvrsti uključci, greške vezivanja i nedovoljan provar (ukazuju da nije izvršeno zavarivanje već samo naljepljivanje dodatnog materijala na osnovni), greške oblika tj. profila lica i korijena šava i ostale greške npr. smaknuće pri zavarivanju limova ili ekscentričnost osi pri zavarivanju cijevi. Pukotine su greške homogenosti materijala, linijske prirode, veliki koncentratori napona sa tendencijom širenja i nisu prihvatljive kod zavarenih konstrukcija. Gasni mjehurovi predstavljaju prostor ispunjen gasom i mogu biti pojedinačni mjehurovi, izduženi mjehurovi, mjehuri u nizu, gnijezdo

mjehura. Uključci mogu biti nemetalni (pojedinačna troska, slojevita troska, gnijezda troske, troska u nizu), i metalni (volfram, bakar, oksidni uključci). Greške vezivanja se odnose na nedovarene površine, nedostatak uvara između zavara, neprovaren korijen, naljepljivanje, crno naljepljivanje, bijelo naljepljivanje. Greške korijena šava se odnose na neprovaren korijen, prokapljine, rohavost, krater u korijenu, udubljenost korijena, rupice na površini. Greške lica šava se odnose na ugorine, prekomjernu udubljenost, prekomjerna izbočenost tjemena, neravnomjerna širina, nejednaki krakovi šava, rastopljen rub, smaknutost, rupica na površini, krater na licu, kapljice, opušten šav. Pukotine se odnose na uzdužne pukotine, poprečne pukotine, zrakaste pukotine, kraterske pukotine.

- Za gasne greške i uključke važi slijedeća napomena: pojedinačne su one greške čija je međusobna udaljenost najmanje jednaka dvadesetstrukoj veličini mjerene najveće pojedinačne greške. Za ostale vrste grešaka, osim pukotina važi napomena: pojedinačne su one greške čiji je zbir dužina manji od 5% dužine koja nam pokazuje uvid u unutrašnje greške šava, npr. pri dužini filma od 48 cm, to iznosi max. 2,4cm. Učestale su one greške čiji je međusobni razmak između osmostruke i dvadesetostruke veličine najveće pojedinačne greške u šavu koji se posmatra. Za ostale vrste grešaka, osim pukotina, važe slijedeće odredbe: učestale su one greške čiji zbir dužina na posmatranom odsjeku iznosi između 5% i 10% dužine odsjeka, npr. pri dužini filma od 48cm to iznosi između 2,4 i 4,8cm. Gnijezda su one greške čiji je međusobni razmak manji od osmostruke veličine najveće pojedinačne greške u šavu. Za ostale greške, osim pukotina važe slijedeće odredbe: gnijezda su one greške čiji zbir dužina na posmatranom odsjeku iznosi između 10% i 25% dužine odsjeka, npr. pri dužini filma od 48cm to iznosi između 4,8cm i 12cm.
- Pod zahtjevima kvaliteta izrade podrazumjeva se pridržavanje izvjesnih pravila za cijelo vrijeme tehnološkog procesa izrade zavarenih spojeva, dakle od pripreme i sastavljanja pojedinih dijelova, kontrole znanja zavarivača, osobina materijala, žlijebova, površine uz žlijeb, izvršenja samog zavarivanja, kontrole završenog zavarenog spoja, pa do toplotne i mehaničke obrade gotovog spoja.
- S obzirom na do sada rečeno, a prema uslovima izrade šavova i stepenu izvršene kontrole, šavovi se dijele na više kvalitetnih klasa. Šavovi najboljeg kvaliteta moraju biti jedri, bez naprslina, grešaka uvarivanja, bez grešaka na početku i kraju šava, sa korijenom koji je očišćen i ponovo zavaren, bez zareza i nadvišenja na licu ili naličju šava, prozračeni na cijeloj dužini da bi se dokazao traženi kvalitet i to snimcima prve klase s obzirom na uočavanje grešaka. Zatim, izrađeni u najpovoljnijim radnim uslovima, u povoljnom položaju zavarivanja, izrađeni sa posebno ispitanim osnovnim i dodatnim materijalom naročito u pogledu žilavosti i otpornosti šava prema pojavi pukotina u vrućem i eventualno hladnom stanju, izrađeni od atestiranih zavarivača sa posebnim atestom za konkretni objekat. Pukotine bilo koje vrste i smjera se ne tolerišu, isto tako neuvarena mjesta, nedovoljno ispunjen šav treba ispraviti dopunskim zavarivanjem, ivični zarezi duž šava ne tolerišu se, na osnovnom materijalu van šava ne smije da bude opekotina od paljenja luka ni naljepljenih kapljica od prskanja elektrode. Izuzetno se dozvoljavaju pojedinačni uključci troske (ako nisu veće od "malih grešaka" i ako su pojedinačni, ali ako su u nizu ne tolerišu se) i gasni mjehurovi (ako nisu veći od "malih grešaka" i ako su pojedinačni, ali ako su u nizu ne tolerišu se). Kod ostalih kvaliteta zavarenih spojeva neki od gore pobrojanih zahtjeva su ostali u cjelosti, a neki su ublaženi. Npr. ako nadvišenje na licu i naličju vara nije veliko i naglo, nego je taj prelaz blag i bez zareza, onda se ne mora obrađivati, ili to da šav ne mora biti prozračen po cijeloj dužini nego 10% do 50% dužine na snimcima druge ili treće klase zavisno da li su statička ili dinamička opterećenja, i od nalaza kontrole itd.
- Obzirom na geometrijski oblik ugaonih šavova, nije moguće njihovo svrstavanje u kvalitetne klase, pa je prema tome opravdana pretpostavka prilikom proračuna da je kvalitet ovih šavova uvijek jednak, bar pri današnjem stanju tehnologija zavarivanja,

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Za korektno provođenje tehnologije zavarivanja u svim fazama odgovorna je služba osiguranja kvaliteta. Ona je dužna da ukaže na sve nedostatke uočene u fazi izrade i da prisno saraduje sa konstrukcionim biroom, tehnološkim odjelom i predstavnicima ovlaštenih institucija. Zavarivanje je multidisciplinarna tehnologija koja je bazirana na skupu formalnih teorija iz oblasti metalurgije, elektrotehnike, mašinstva i srodnih naučnih disciplina.

Za potpuno razumjevanje procesa zavarivanja vrlo su bitna istraživanja u oblastima koja tumače iz kojih razloga je nastalo neko pravilo, npr. zašto je neki materijal pogodan za zavarivanje a drugi je manje pogodan, zašto je potrebno štiti varove u toku izrade, ili iz kojih razloga se koristi određena tehnologija zavarivanja i slično. Određivanje načina i obima kontrole zavarenih spojeva regulisano je ugovorom izvođača i naručioca i tehničkim propisima. Greške često nastaju pri izradi zavarene konstrukcije i broj grešaka je realni pokazatelj racionalnosti primjenjenog postupka zavarivanja, pogodnosti korištenih osnovnih i dodatnih materijala, stručnosti kadra, te cjelokupnog tehničkog nivoa proizvodnje. Plan kontrole je sastavni dio tehničke dokumentacije i njega formira konstrukcioni biro u saradnji sa službom osiguranja kvaliteta. Najvažniji dio npr. radiografske kontrole je donošenje pravilne ocjene značaja pojedinih grešaka koje su ustanovljene na radiogramima. Interpretacija rezultata nalaza na radiogramima je izuzetno složena. Zato te analize mora vršiti visoko stručni lice koje poznaje zavarene konstrukcije, naponska stanja u kritičnim mjestima konstrukcije, odlično poznavanje svih mogućih grešaka u zavarenim spojevima i njihov uticaj na funkcionalnost odnosno uticaj na statičku i dinamičku nosivost konstrukcije, kao i poznavanje tehničkih normativa koji se odnose na određenu zavarenu konstrukciju. Samo provođenje ispitivanja zavarenih spojeva vrši služba kontrole uz prisustvo naručioca ili ovlaštenih inspeksijskih službi, zavisno od složenosti zavarene konstrukcije. Služba osiguranja kvaliteta dužna je izdati pismeni dokumenat i decidirani zaključak o kvalitetu zavarenih spojeva. Dakle, primjena propisa je neophodna da bi se za svaki zavareni spoj dobio potreban kvalitet, a propisi se primjenjuju od projektovanja, zatim primjena propisa pri izvođenju zavarene konstrukcije pa do primjene propisa pri kontroli zavarenih spojeva. Uslovi i uticaji za postizanje kvaliteta zavarenih spojeva prema do sada rečenom odnose se na osnovne uticaje (jačina osnovnog materijala, vrsta šavova, vrsta opterećenja) i tehnološke uticaje (sastav i kvalitet osnovnog i dodatnog materijala, priprema dijelova za zavarivanje, izvođenje zavarivanja, kontrola zavarivanja). Pri određivanju kvaliteta zavarenih spojeva treba voditi računa da ona nije podjednako važna i bitna za sve vrste spojeva i opterećenja i za sve dijelove konstrukcije. Iz tih razloga utvrđeno je da se propisuje više stepena kvaliteta zavarenih spojeva. Na taj način omogućeno je da se propiše onaj kvalitet zavarenih spojeva koji je tehnički potreban, a istovremeno ekonomski opravdan. Može se zaključiti da je zavarivanje danas jedna od ključnih tehnologija u mašinskoj industriji i da ima stalnu ekspanziju. Napredak u oblasti zavarivanja će se ogledati prvenstveno u intenzivnom razvoju opreme za zavarivanje, a manje u otkrivanju novih i boljih postupaka. Prema svim analizama u budućnosti će dominaciju imati MAG / MIG postupci (velika fleksibilnost, mogućnost automatizacije, razvoj kvalitetnih dodatnih materijala itd.) bar što se tiče lakših i teških čeličnih konstrukcija, dok će REL zavarivanja ipak opstati (do 30%) uprkos automatizaciji i robotizaciji zavarivanja, i to pogotovo u reparaciji. Zavarivanje ultrazvukom i laserom će se mnogo koristiti za tanke materijale u elektronskoj, raketnoj i drugim preciznim industrijama.

6.LITERATURA

- /1/ Rampaul,H.: Pipe Welding Procedures, TWI Press, Inc.,1998.
- /2/ Mohler,R.: Practical Welding Technology, TWI Press, Inc.,1999.
- /3/ Houldcroft,P., John,R.: Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Procedures, TWI Press, Inc.,1998.
- /4/ Mouser,J.: Welding Codes, Standards and Specifications, TWI Press, Inc.,1998.
- /5/ Repčić,N.i saradnici: Mašinski elementi, I i II dio, Svjetlost, Sarajevo,1998.
- /6/ Matek,W.: Maschinenelemente, Berechnung, Gestaltung, Wiesbaden,1994.
- /7/ Web site - [http:// www / science / engineering / design / welding](http://www/science/engineering/design/welding).
- /8/ Standardi: ISO, DIN, EN, ASM Handbook Series – Welding, Brazing, Soldering.