

VITUS DOBOŠASTI
RAZMENJIVAČI
TOPLOTE

Rikalović Milan 2024

ZAVARIVANJE CEVI U CEVNOJ PLOČI

(Prema monografiji TOM I – DRT Klasifikacija i konstrukcija, Novi Sad 2024)

E. Ručno i automatsko zavarivanje

Glavno ograničenje ekspandiranih spojeva je dejstvo povišenih pritisaka, temperatura ili istovremeno oba uticaja, kada dolazi do poremećaja naponske ravnoteže spoja između cevi i ligamenta i pojave curenja. Slabljenje ekspandiranog spoja pod dejstvom pritiska i temperature, zavisi od osobina materijala u sprezi i primenjenog postupka ekspanzije. Za procese gde se zahteva visoka sigurnost od propuštanja spoja, zabranjena je upotreba ekspandiranih spojeva, u tom slučaju za njih je obavezna izrada zavarijenog spoja. Iako se postupci zavarivanju detaljno razmatraju u delu fabrikacije razmenjivača toplote, zbog specifičnosti i celovitosti postupka spajanja cevi i cevne ploče, u ovoj tački je posebno ubačen deo o spajanju procesom zavarivanja. Zavareni spoj postaje prva opcija spoja cevi i cevne ploče u sledećim okolnostima: nije moguće ostvariti potreban zazor za ekspanziju, visoke temperature fluida u radnom režimu, visok uticaj korozije na mestu spoja, ograničen pristup mestu spoja u toku izrade i održavanja, potrebna visoka bezbednost spoja. U navedenim slučajevima jedina alternativa procesu zavarivanja je eksplozivna ekspanzija i zavarivanje, kao što je navedeno u prethodnoj podtački.

Zavareni spoj cevi i cevne ploče primarno se koristi u sledeća dva slučaja, za obezbeđenje nepropusnosti (zaptivno zavarivanje), ili za potrebe obezbeđenja istovremene nosivosti i nepropusnosti spoja. Glavna razlika ovih modaliteta je u geometriji spoja za zavarivanje, kao i u redosledu i postupku izrade spoja.

Detaljnije o procesu zavarivanja videti u tački 4.2.6, a pri zavarivanju cevi i cevne ploče, prema ISO-4063 i AWS, HEDH [2], najčešće se primenjuju procesi:

a) 111 Ručno elektrolučno zavarivanje (REL), (EU-MAW, USA-SMAW)

To je najčešće korišćen proces zavarivanja, zbog niskih troškova opreme i prihvatljivosti manjeg odstupanja dimenzija i stepena čistoće, slika, Sl. 2.22a). Moguća je solidna brzina zavarivanja, npr. za cevi prečnika $d_s=25$ mm moguće je uraditi 20-30 spojeva na sat. Najpogodniji je za velike zavare ili duboke žljebove za visoku čvrstoću spoja, ali nije prihvatljiv za velike gustine cevnih otvora, zbog male debljine ligamenta. Preporučljiva je minimalna debljina ligamenta 2,5 puta veća od debljine zida cevi, obično do 8,5 mm. Uticaj veštine operatera raste što su cevi manjeg prečnika i manje debljine zida. Iskustvo pokazuje da se ovim postupkom mogu

zavarivati cevi prečnika do $d_s=25$ mm i debljine do $s=2,5$ mm. Položaj cevi pri zavarivanju može biti horizontalni ili vertikalni, ali horizontalni položaj je bolji kod razmenjivača sa pravim cevima.



Sl. 2.22. a) Ručno elektrolučno zavarivanje, b) TIG zavarivanje žicom u zaštiti argona

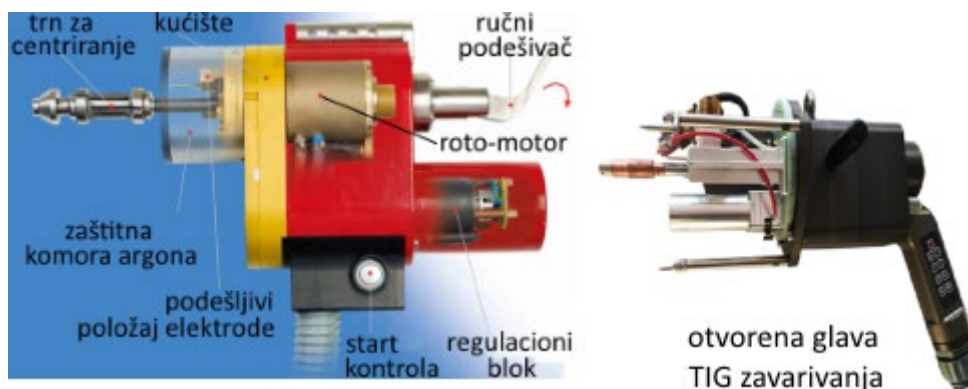
b) 141 TIG zavarivanje žicom (EU-TIG (WIG), USA-GTAW)

U ovom procesu, luk se uspostavlja između netrošive volframove elektrode i površine koja se zavaruje, posle čega se dodaje metalna žica za varenje, odabrana za postizanje potrebnih svojstava spoja, slika, Sl. 2.22 b). Spoj se može načiniti i bez dodatnog materijala kada se naziva "autogenim", u tom slučaju materijali cevne ploče i cevi moraju biti tako izabrani da ne stvaraju defekte, poroznost ili pucanje spoja. Pri ovom postupku moguća je visoka kontrola od strane operatera, naročito ako se koristi oprema sa visokofrekventnom regulacijom, koja obezbeđuje stabilnost luka u startu, a zatim se isključuje. U toku procesa zavarivanja koje može biti ručno ili automatsko, luk mora biti zaštićen inertnim gasom, obično argonom.

I. Ručni TIG postupak. Cena TIG opreme je niska, ali je i brzina zavarivanja niska, obično 10-20 varova na sat za cevi $d_s=25$ mm. Zavarivanje je bez (filet) ili sa pripremom (žljeb), a niska brzina zavarivanja omogućuje zavarivaču veću kontrolu nad zavarom, tako da se mogu zavarivati cevi malog prečnika i male debljine zida. Širina ligamenta iznosi obično oko 5 mm. Za zavarivanje s visokim stepenom pouzdanosti, potrebna su dva prolaza, pri čemu se ispitivanje na curenje vrši posle prvog prolaza zavarivanja. Kod zavarivanja tankih cevi od nerđajućeg ili visoko legiranog čelika, potrebno je zaštititi unutrašnjost cevi, da bi se sprečila oksidacija materijala cevi, što se može postići plavljenjem suprotnog kraja cevi argonom. Za visoko oksidacione materijale, kao što je titan, oko plamenika moraju se postaviti dodatni štitnici za argon, radi sprečavanja oksidacije područja zavara. Cevna ploča pri zavarivanju može biti horizontalna ili vertikalna, ali vertikalni položaj ima bolju vidljivost i udobnost rada, što je prednost i pri zavarivanju obe strane pravih cevi.

II. Automatski TIG postupak. Razlika u ceni između ručnog i automatskog TIG postupka je 10 do 100 puta. Cenu povećava najviše rotaciona (orbitalna) glava za zavarivanje, koja se uglavnom fiksira pomoću trna za centriranje u zavarivanu cev ili pomoćnih bočnih nosača u susednim otvorima. Glava za zavarivanje može biti različite složenosti i mogućnosti upravljanja. Na slici, Sl. 2.23., je prikazana otvorena i zatvorena glava sa trnom i pomoćnim nosačima, koje mogu imati kolut žice,

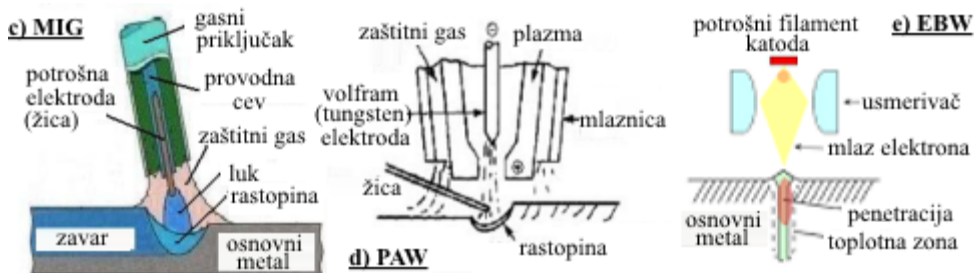
regulator zavarivanja, kao i podešavanje brzine okretanja nosača elektrode i sl. Sistem može imati programabilne funkcije pranja pre i posle zavarivanja, podešavanja jačine napona i struje itd. preko mikroprocesora, čime se dobija sigurnost od promene režima u toku rada od neovlašćenih osoba. Većina automatskih orbitalnih jedinica TIG zavarivanja, je u stvarnosti poluautomatska, jer kontrolu završenosti procesa, izbor sledećeg mesta rada i prebacivanje glave obavlja operater, ali on to može činiti na većem broju glava istovremeno.



Sl. 2.23. Automatske orbitalne glave, sa i bez zaštitne komore argona, Polysoude, Francuska

c) 131 MIG zavarivanje žičanom elektrodom (EU-MIG, USA-GMAW)

U ovom procesu, slično kao u TIG procesu uspostavlja se luk između radnog predmeta i sada potrošne elektrode u obliku žice, koja se dovodi kroz glavu ili pištolj, slika Sl. 2.24c), koja je produžetak slike Sl. 2.22. Luk je u oblozi zaštitnog gasa, koji se takođe dovodi preko glave. Dužina luka se kontroliše automatikom izvora napajanja, kao i konstatna brzina dotoka žice, na osnovu čega se podešava količina dodatnog materijala. Žica kao dodatni materijal mora biti kompatibilna materijalu, cevne ploče i cevi, a zaštitni gas je najčešće argon, ali mogu biti i mešavine u skladu sa EN ISO 4063. Cena opreme je slična TIG opremi, ali brzina zavarivanja je više slična elektrolučnom zavarivanju (MAW). MIG postupak se skoro isključivo primenjuje za spoj u žljebu, s obzirom na to da glava



Sl. 2.24. Procesi zavarivanja: c) MIG-žica, d) PAW- plazma, e) EBW-elektronski mlaz

ima ograničeni pristup zaobljenju spoja, osim za velike dimenzije ligamenta. Iako se čini da je postupak jednostavan, bez dobrog iskustva i talenta operatera mogu nastati spojevi lošeg kvaliteta u kojima nema dovoljne dubine fuzije u materijalu, stoga iako je MIG postupak brži od TIG postupka pri zavarivanju cevi u cevnu ploču, bolji kvalitet daje TIG postupak.

d) 15 Zavarivanje plazmom (PAW)

Ovaj proces je sličan TIG procesu jer se uspostavlja luk između netrošive elektrode i bakarne sapnice glave, a takođe ima i zaštitni gas. Glavna razlika je u tome, što postoji plazma, odnosno jonizovani gas, koji se dobija prolazom smese argona i vodonika preko luka pri čemu dostiže veliku brzinu i temperaturu od oko 30.000°C, videti sliku Sl. 2.24d). Zaštitni gas se koristi za okruženje mlaza plazme i rastopljenog metala. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika zaštitni gas je argon, za Cr-Ni čelike koristi se mešavina argona i vodonika, dok se za zavarivanje aluminija koristi argon i mešavine s helijumom. Prednost PAW u odnosu na TIG proces je njegova veća koncentracija energije, koja daje mnogo uži i prodorniji luk, međutim oprema je mnogo skuplja, a glave glomaznije, što otežava rad sa cevima malog prečnika, pa je primena ograničena.

e) 51 Zavarivanje elektronskim mlazom (EBW)

Glavni deo oprema za proces je glava (ili pištolj), koja sadrži filament ili katodu koja emituje elektrone za formiranje snopa (rešetka ili "Wehnelt"), dok se anoda i magnetni namotaji nalaze u usmerivaču koji služi za ubrzanje i usmerenje snopa. Usled dejstva visokog napona za generisanje snopa elektrona nastaju i X zraci, tako da oprema mora biti projektovana sa odgovarajućom zaštitom osoblja, što je veoma poskupljuje i ograničava primenu. Elektronski mlaz greje i topi površinu zavara, pri čemu se ne koristi dodatni materijal. Najbolja penetracija se postiže, ako se proces obavlja u vakumu u obliku lokalne ili fiksne komore, slika Sl. 2.24e), usled čega se sprečava stvaranje mehurića u rastopini, čime spoj postiže visoku nepropusnost, bez pojave korozije. EB glava se obično montira na numerički upravljani X-Y pozicioner, a zavarivanje se vrši elektromagnetskim okretanjem snopa oko cevi, pri čemu stvarna glava zavarivanja ostaje nepomična. Pogodan je za spajanje obojenih metala sa nerđajućim čelikom pri čemu se postižu vrlo visoke brzine zavarivanja, čak do 300 spojeva cevi na sat, koji zbog duboke penetracije imaju veliku čvrstoću.

Priprema za zavarivanje, tok i ispitivanje zavarenog spoja

Oblik šava zavarivanja treba odabrati tako da daju potrebnu nepropusnost i čvrstoću, a da cena bude ekonomična. Najjednostavniji oblik šava cevi i ploče je običan ugaoni šav u jednom prolazu, koji se dobija bez pripreme, pri čemu se cev malo izvuče ispred ploče (do 2 mm), međutim ovakav šav ima najveći rizik od propuštanja. Sigurniji zavareni spojevi dobijaju se ako se izvrši prethodna priprema žljeba u koji se naliva dodatni materijal, ili šav formira u više prolaza, međutim za ovakve šavove je potrebna veća širina ligamenta ili će doći do preklapanja zavara susednih cevi. Oblik šava ponekad uslovljava izabrani proces zavarivanja, da bi se dobili najbolji rezultati spoja, a prisutne su i preporuke dominantnih proizvođača

opreme za zavarivanje. Ipak dosta reda uneli su ISO standardi, naročito ISO 9692:2003, koji sistematizuju iskustvene preporuke pripreme šava u zavisnosti od zavarivačkog procesa i materijala koji se zavaruje. Ovaj standard je podeljen u 4 dela, od kojih za potrebe razmenjivača toplote najvažniji deo 1 - ručno elektrolučno zavarivanje, zavarivanje u zaštiti gasa, gasno zavarivanje, TIG i zavarivanje mlazom, za čelike i donekle deo 3 - zavarivanje aluminijuma i njegovih legura.

Geometrija šava, naročito u području opreme pod pritiskom (PED), je često povezana i sa detaljima konstrukcije opreme, pri čemu se javljaju različiti modaliteti, koji su primereno sistematizovani u standardu EN 1708:2010, posebno za PED opremu (deo 1), a posebno za opremu koja nije pod dejstvom unutrašnjeg pritiska (deo 2). Preporuke su usklađene sa oblikom šava (ISO 9692) i date kao primeri za primenu u zavisnosti od namene konstrukcionih detalja u 14 grupa, pri čemu grupa 7 sadrži 9 predloženih detalja spoja cevi i cevne ploče, što ne isključuje i vanstandardne konstrukcije za specijalne namene. U skladu sa ISO 9692-1 i EN 1708 u tabeli TAB.2.10, dati su detalji za izbor oblika, kao i geometrija za pripremu izrade šava za zavarivanje cevi i cevne ploče. Slično, može se koristiti neobavezni dodatak A, ASME BPVC.VIII-1:2015, u kome se nalazi proračun i priprema spoja za zavarivanje i lemljenje. Izbor procesa zavarivanja i geometrija šava mora biti predmet analize, iskustva i konsultacije sa korisnikom, a dodatni detalji i pomoć nalazi se u VDI Waerme Atlas [3], i HEDH [2].

Cevna ploča posle bušenja otvora mora biti detaljno očišćena od zaostalog špina, sa blago oborenim ivicama (nije priprema za zavarivanje), a cevi pre ubacivanja pregledane i sa očišćenim i odmašćenim krajevima za zavarivanje. Ako cevi nisu čvrsto postavljene u otvoru (bez pomeranja), moraju se prethodno fiksirati, što se može postići lokalnim zavarivanjem sa unutrašnje strane ploče ili blagom mehaničkom ekspanzijom cevi, ali ne u blizini budućeg zavara.

Najveći broj jedinica u proizvodnji dobošastih razmenjivača toplote ima zahtev za tankozidim cevima (do 3 mm), pa se za zavarivanje koriste spojevi 7.1.1 i 7.1.9, a zatim 7.1.2, 7.1.3 i eventualno 7.1.6 prema EN 1708-1, a procesi zavarivanja MAW, TIG i MIG. Najjednostavniji je običan ugaoni šav bez pripreme (eng. fillet, nem. Kehlnähte) u jednom prolazu. Visina cevi koja viri iznad cevne ploče, zavisi od broja prolaza procesa zavarivanja i zahteva zavarivača. Zavarivači često imaju različite navike i iskustvo, pa prethodne konsultacije mogu otkloniti moguće nesporazume. Pri zavarivanju je bitan početak i završetak šava, on treba da je dovoljno odmaknut od cevi, da je odmah ne sagori, a na izlazu kružni preklap zavara oko 20° (Singh-Soler [64]), takođe odmaknut od zida cevi. Da ne dođe do preklapanja zavara susednih cevi, debljina ligamenta mora biti najmanje dva puta veća od debljine zida cevi. Ukoliko pak nastane preklapanje zavara, za utvrđivanje penetracije i provarljivosti na mestu preklopa, izvođač mora postupiti prema utvrđenoj proceduri pregleda i ispitivanja. Veća širina zavara može prelaziti na stranu otvora u cevi, što pored štetnog uticaja na strujanje fluida u cevi ima i veoma ružan izgled, a znak je loše odabranih parametara zavarivanja ili grešaka operatera.

TAB. 2.10. Priprava za zavarivanje spoja cevi i cevne ploče, prema EN 1708-1:2010

No	SKICA ZAVARA	Mere sa skice (mm)	No	SKICA ZAVARA	Mere sa skice (mm)
7.1 Veza između cevi i cevne ploče					
7.1.1		$t \leq 2,6$ $0 \leq x \leq 2$	7.1.6		$w = t$ $1,5 \leq m \leq 2t$ za $t < 5$
7.1.2		$t > 2,6$ $x \geq 6$	1)* Zavarivanje na rupi iznutra 2)* Samo za automatsko TIG zavarivanje		
7.1.3		$t > 2,6$ $t \leq h \leq 1,5t$ $x = h - l$ $r = t$	7.1.7		$w = t$ $x = 0,5w$ $0,5 \leq m \leq 2t$ $h = 0,5t$
7.1.4		$h \approx t$ $x = h - l$ $t \geq 5$ $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	7.1.8		$w = t$ $x = 0,5w$ $1,5 \leq m \leq 2t$ $h = 0,5t$
7.1.5		$w = t$ $h \approx t$ $1,5 \leq m \leq 2t$ $t \geq 5$ $\alpha = 30^\circ$	7.1.9		$l \geq 1,5t$
*3.1.1 EN ISO 9692-1		$b \leq 2$ $t1 > 2$ $t2 > 2$ $70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	*1.1 EN ISO 9692-1		$t < 2$

Pri zavarivanju sa žljebom (spojevi 7.1.3 i 7.1.9), posebno se mora obratiti pažnja na položaj kraja cevi, kao i mogućnost progorevanja tankog zida cevi. Spoj 7.1.3 se koristi za jedan ili više prolaza. ako se zahteva šav ravan sa prednjom stranom cevne ploče, pogodan je za veće debljine zida cevi i ligamenta.

Za cevne ploče koje su izložene opasnosti deformisanja (nedovoljna debljina ploče), preporučuje se priprema 7.1.6 i izrada ivičnog spoja (eng. edge joint), za koji je potrebna veća debljina ligamenta zbog izrade kružnog šljeba za svaki otvor u cevnoj ploči. Pogodan je TIG zavarivački proces bez dodatnog materijala, penetracija nije duboka i spoj nije pogodan za udarna naprezanja.

Kao što je na početku ove podtačke bilo reči zavarivanje se koristi za obezbeđenje nepropusnosti (zaptivno zavarivanje), ili istovremeno nosivosti i nepropusnosti spoja. Prema geometriji pripreme spoja cevi i cevne ploče, prema EN 1708-1, za nepropusnost se koriste spojevi bez žljeba, a za nosivost sa žljebom.

Predgrevanje pre zavarivanja obično nije potrebno, ali za niskougljenične i ugljenične čelike sa dodatkom hroma i molibdena, nisko predgrevanje utiče na smanjenje opasnosti od otvrdnjavanja i pucanja po rubu zavara. Preporučuje se predgrevanje minimum do 100°C ugljeničnih čelika sa dodatkom 0,5% Mo, ili 1% Cr i 0,5% Mo, dok predgrevanje minimum do 200°C pogoduje ugljeničnim čelicima sa dodatkom 2,5% Cr i 1% Mo, ili 4-6% Cr i 0,5% Mo. Predgrevanje se vrši i za MAW i TIG procese zavarivanja, najbolje električnim grejačima. Ukoliko je projektom predviđeno, posle zavarivanja može se vršiti toplotna obrada zavara, u zavisnosti od materijala cevi i cevne ploče, radi otklanjanja zaostalih napona, naročito ako materijali imaju velike razlike u koeficijenti linearnog širenja. Ovu operaciju treba izvoditi pažljivo sa dovoljnim brojem mernih tačaka, jer previsoko i prebrzo grejanje može izazvati deformaciju cevi ili zavara.

Ispitivanje zavarene cevne ploče mora se izvesti barem na jedan od sledećih načina: vizuelni pregled, penetrantima i pneumatski i to pre obavezne hidrauličke probe. Vizuelnim pregledom iskusnog operatera (sa ili bez lupe) mogu se otkriti brojni nedostaci koji se mogu otkloniti, dok se penetrantima mogu otkriti mikropukotine zavara (radiografski ako je zavar na naličju ploče), dok je za curenje najbolje izvršiti pneumatsku probu na 0,5 bara uz premaz sapunicom mesta zavara. Veći pritisak nije potreban, a može biti opasan zbog ekspanzionog dejstva gasa u slučaju pucanja. Ispitni medijum je obično vazduh, a u slučaju visokih zahteva (kao npr. rad sa halogenim fluidima) ispitni gas može biti helijum, argon ili vodonik uz upotrebu osetljivih aparata za utvrđivanje lokacije propustljivosti. Ispitivanje treba sprovesti posle svakog sloja zavara. Ako je radni fluid na temperaturama, koje mogu izazvati propuštanje usled širenja pukotina, ispitivanje na nepropusnost treba vršiti helijumom posle zagrevanja spojeva dejstvom vodene pare.

Glavni nedostaci, odnosno ograničenja zavarivanja, koje navodi glavni promoter ekspanzionog spoja cevi i cevne ploče S. Yokell [J20], su sledeći:

- Mora postojati zavarljivost i kompatibilnost materijala cevi i cevne ploče, kao i dodatnog materijala ako se koristi pri spajanju, inače je zavarivanje nemoguće.

- Ukoliko koeficijenti toplotnog širenja materijala koji se zavaruju imaju znatno različite vrednosti, pri očvršćavanju zavara nastaju toplotna naprezanja usled različitih brzina hlađenja komponenti zavarenog spoja, koja smanjuju nosivost spoja, a mogu izazvati i pojavu pukotina. Zbog zaostalih napona neki normativi (ASME BPVC VIII-1) propisuju toplotnu obradu posle zavarivanja (eng. PWHT).

- U slučaju zavarivanja cevi s prednje strane ploče, usled zazora između cevi i cevnih otvora s naličja ploče može nastati pojačana korozija.

Ukoliko postoji dilema da li je proces zavarivanja najbolji postupak za spoj cevi i cevne ploče u datom sistemu s dobošastim razmenjivačem toplote, potrebno je konsultovati iskustvene preporuke, jedna od najboljih je API 660 (ISO 16812). Prema API 660[90.1], pre svega u industriji nafte i gasa, preporuke zavarivanje su:

- U slučaju da plastično ojačanje materijala cevi tokom valcovanja može izazvati potencijalno pucanje cevi, a u slučaju pojave korozije u zazoru cevi i cevni otvora sa strane doboša razmenjivača toplote, mora se koristiti i zavarivanje i valcovanje.

- U slučajevima ako su neki od parametara procesa izvan predloženih granica:

- a) Pritisak fluida sa bilo koje strane spoja prelazi 70 bara (1000 psig);
- b) Ako je bilo koji fluid tečni sumporvodoničnik, a cevi dupleks nerđajući čelik;
- c) Ako se koriste titanske cevi (pod uslovom da debljina zida cevi odgovara);
- d) Ako se koriste austenitne cevi nerđajućeg čelika a cevna ploča je od feritnog čelika i temperatura fluida sa bilo koje strane iznad 205°C;
- e) Za razmenjivače sa fiksnim cevni pločama u aplikacijama koji sadrže sumpor, (npr. razmenjivači otpadne sumporovite vode, predgrejači sumporne kiseline, itd.);
- f) Kod razmenjivača toplote koji sadrže fluide radnih temperatura iznad 205°C;
- g) Ako postoji dejstvo pritiska, temperature ili vibracija promenljivih vrednosti i pojave zamora spoja cevi i cevne ploče (tzv. ciklična opterećenja);
- h) U slučajevima gde se mogu pojaviti iznenadni temperaturni skokovi;
- i) U slučaju gde je odnos čvrstoće cevne ploče i cevi manji od 0,6;

U skladu sa neobaveznim dodatkom A, ASME BPVC.VIII-1:2015, koristiti još:

- Ako curenje na stranu niskog pritiska nije dozvoljeno u procesu (npr. zbog zagađenja fluida niskog pritiska ili rizika u komunalnim sistemima - pitka voda).

- Za razmenjivače koji rade s vodom ili vodom za napajanje kotlova, ako nazivni pritisci prelaze 150 bara.

- Za razmenjivače toplote u kojima je bar jedan fluid vodonik, spoj cevne ploče i cevi mora biti zavaren i valcovan u sledećim slučajevima:

- a) Kada je projektni pritisak razmenjivača 70 bara ili više.
- b) Kada je projektna temperatura viša od 230°C.

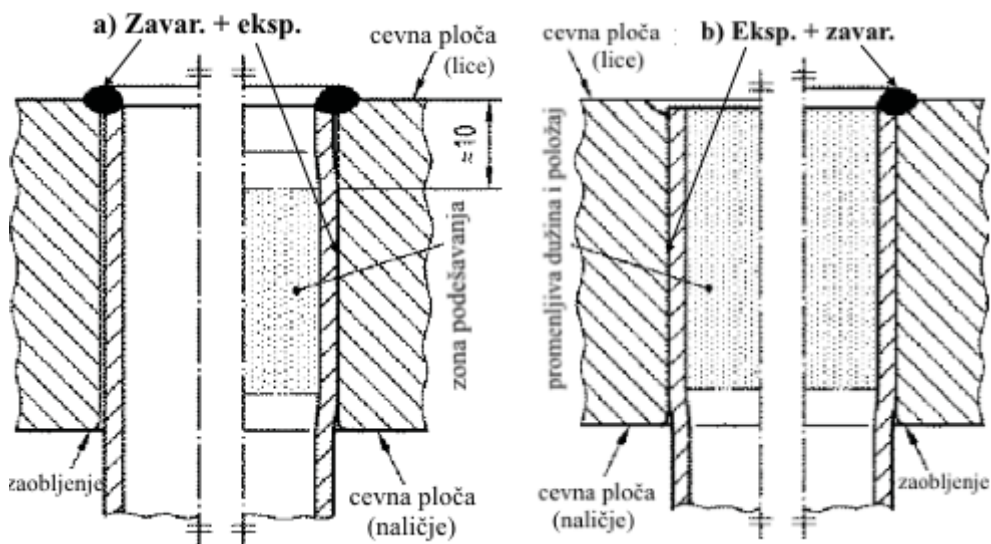
F. Kombinovani spoj zavarivanjem i ekspanzijom ili obrnuto

Dva glavna modela spoja cevi i cevne ploče su ekspanzija i zavarivanje, pa postaje logično da postoje uslovi u kojima je preporučljivo koristiti oba modela na

istom spoju. Glavna prednost koja preporučuje zavarivanje je pored široke primene i visoka nepropusnost spoja u veoma širokim granicama upotrebe, dok je glavna prednost ekspanzionog spoja eliminacija zazora između cevi i otvora cevne ploče i sprečavanje korozije spoja sa strane doboša.

Iako ne postoji spor oko korisnosti istovremene upotrebe zavarivanja i ekspanzije pri spajanju cevi i cevne ploče, postoji polemika o redosledu izvođenja. Pomenuti Yokell [120], predlaže sledeće kriterijume određivanja redosleda spoja:

- Zahtev da površine spoja budu i ostanu veoma čiste (stvarno, ne deklarativno),
- Zahtev da postoji otvoren put za izlaz gasova pri zavarivanju,
- Zahtev da se obezbedi potreban maksimalni zazor u korenu vara,
- Zahtev da se omogući popravka neuspehlih zavarenih spojeva.

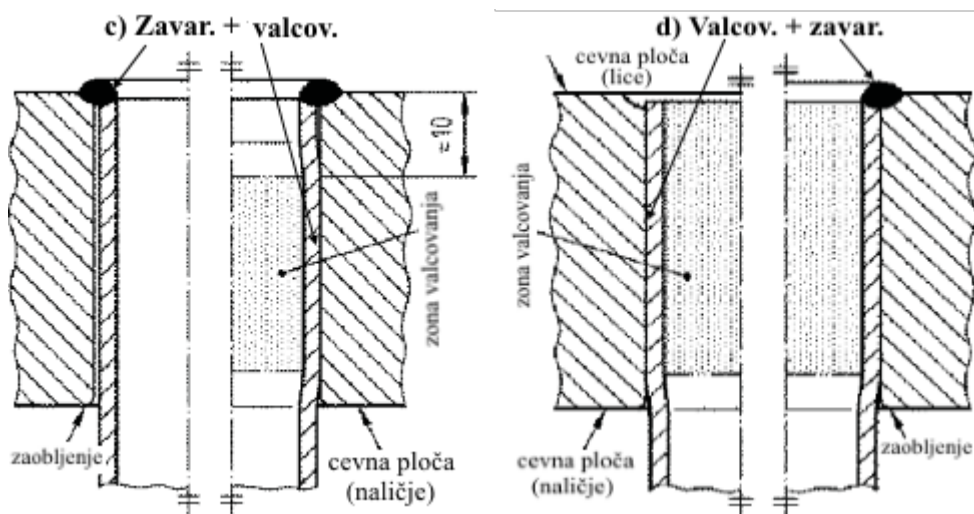


Sl. 2.25. Postupak zavarivanja i ekspanzije cevi do zida otvora, DIN 28187:2009,
 a) Zavarivanje + ekspanzija do zida, b) Ekspanzija do zida + Zavarivanje.

Procedura izrade spoja cevi i cevne ploče zavarivanjem i ekspanzijom je obrađena u pominjanom standardu DIN 28187 pri čemu se mogu izdvojiti dve grupe u zavisnosti od toga koji postupak nosi čvrstoću spoja. Na slici Sl. 2.25, je prikazan slučaj da je zavareni spoj nosilac čvrstoće i zaptivanja spoja, a valcovanje je pomoćni postupak širenja cevi do zida otvora radi sprečavanja korozije sa strane doboša (naličje ploče). Varijanta pod a) prvo se vrši zavarivanje pa ekspanzija, a u varijanti pod b) prvo se vrši ekspanzija pa tek onda zavarivanje. Ekspanzija cevi u obe varijante je u plastičnom području, ali bez stvaranja pritiska između cevi i ligamenta,

tako da je u slučaju potrebe olakšana demontaža cevi. Ako se prvo vrši zavarivanje, ekspanzija se ne obavlja do mesta zavara, prostor od oko 10 mm služi da se izbegne deformacija cevi u njegovoj blizini, a ako se vrši prvo ekspanzija, ona ide do kraja otvora cevi, da ne ostane prostora za skupljanje produkata sagorevanja pri kasnijem zavarivanju spoja. Na licu cevne ploče treba uraditi pripremu za izradu nosivog spoja, a na naličju treba zaobliti ivice. U opciji, ako je prva ekspanzija, ne sme se koristiti ulje zbog kontaminacije zavara, a ako je prvo zavarivanje, ekspanzioni spoj mora proklizavati.

U drugoj kombinaciji valcovani spoj nosi opterećenje, a proces zavarivanja je predviđeno radi zaptivanja. I ovde postoje dve varijante, prikazane na slici Sl. 2.26, slučaj pod c) prvo se obavlja zavarivanje a potom valcovanje, dok je pod d) prikazana varijanta, prvo valcovanje, a zatim zaptivno zavarivanje. U opciji pod c)



Sl. 2.26. Postupak zavarivanja i valcovanja cevi do zida otvora, DIN 28187,
c) Zavarivanje + puno valcovanje, d) Puno valcovanje + Zavarivanje.

važno je da je cev pričvrćena za ligament pre zavarivanja, ali da ne prenosi zaostale napone na zavar (slično slučaju b), dok se valcovanje posle zavarivanja obavlja u punom obimu, pri čemu se do zavara ostavlja slobodna zona od oko 10 mm, radi izbegavanja prenosa deformacije cevi na zavar ili smicanja zavara. U varijanti pod d) najpre se vrši valcovanje cevi u punom obimu do kraja otvora na licu ploče, a zatim zavarivanje na licu ploče samo u funkciji zaptivanja. Ova varijanta zahteva značajno iskustvo operatera, zbog mogućih zaostalih napona usled valcovanja u toku

zavarivanja jer nema proklizavanja, a moguća je i opasnost od prisustva ulja od prethodno valcovanog spoja.

Većina dominantnih proizvođača dobošastih razmenjivača toplote koristi varijantu prvo zavarivanje a zatim ekspanzija, čemu u prilog ide i analiza eksperta za spoj cevi i cevne ploče S. Yokella, koji kao prednost postupka navodi sledeće dve činjenice: Postoji slobodan protok gasova zavarivanja duž zazora cevi otvora u cevnoj ploči, a nema ni sagorevanja zaostalog ulja niti zaostalih zarobljenih ljušpica usled trenja pri valcovanju bez ulja. Navedeni redosled je prihvatljiv za sve materijale osim za spoj titanske cevi i titanske ploče, gde je neophodno ostvariti pri zavarivanju minimalni zazor između cevi i otvora u ploči. Prema S. Yokell posle zavarivanja cevi i lica ploče preporučuje se valcovanje u punom obimu, i to zbog:

- Sprečavanja prenosa vibracija na zavareni spoj;
- Punog kontakta cevi i cevne ploče, koji omogućuje bolji prenos toplote sklopa;
- Posle valcovanja skoro po celoj debljini ploče (slučaj c, DIN 28187) nosivost spoja cevi i cevne ploče i ligamenata postaje znatno viša, što nije moguće ako je ekspanzija cevi izvršena samo do zida otvora u cevnoj ploči (slučaj a, po DINu). Usled dejstva radnog pritiska, puzanja ili zaostalih napona, ovakav spoj može da prokliza i smanji nosivost ligamenata.

Za konačan izbor vrste spoja i komparaciju raznih varijanti postupka, nosivost ostvarenog spoja cevi i cevne ploče se može graduisati pomoću faktora pouzdanosti, koji je delimično naveden u prikazanoj tabeli prema neobaveznom dodatku A, standarda ASME BPVC.VIII-1:2015.

No	Opis spoja	faktor pouzdanosti f_r (bez testa)
1.	Samo zavaren, visina zavara $a \geq 1,4 t$ (t - debljina zida cevi)	0,80
2.	Samo zavaren, visina zavara $t \leq a \leq 1,4 t$ (t - debljina zida cevi)	0,55
3.	Zavaren i valcovan, visina zavara $a \geq 1,4 t$ (t - debljina zida cevi)	0,80
4.	Zavaren i valcovan $a < 1,4 t$ sa dodatkom dva i više žljebova	0,75
5.	Zavaren i valcovan $a < 1,4 t$ sa dodatkom jednog žljeba	0,65
6.	Zavaren i valcovan $a < 1,4 t$ bez žljebova	0,50
7.	Valcovan spoj, sa dodatkom dva i više žljebova	0,70
8.	Valcovan spoj, sa dodatkom jednog žljeba	0,65