

# ZAVARIVANJE ČELIČNIH PLINOVODNIH CIJEVI

## WELDING OF STEEL GAS PIPELINES

Dr.sc. Ivan Samardžić, EWE \*

Mr.sc. Štefanija Klarić \*

Alan Grdan dipl.ing., EWE \*\*

Hrvoje Boduljak. Student \*

\* Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg. I.B. Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod

\*\* STSI d.o.o., član INA grupe, Zagrebačka bb 10313 Graberje Ivaničko

### 1. UVOD

Iako su po udjelu čelične plinovodne cijevi manje zastupljene u odnosu na PE-HD cijevi, one se i dalje primjenjuju, te se u određenim situacijama nameću kao tehnologično ili kao jedino moguće rješenje (npr. visoki tlakovi, povišene temperature). Tako se na relaciji magistralnog plinovoda Slav. Brod – Zagreb koriste 24 ' čelične cijevi debljine stjenke 8.8, 10.3 i 12.9 mm. Spajanje čeličnih cijevi tehnologijom elektrolučnog zavarivanja je znatno kompleksnije u odnosu na spajanje PE-HD cijevi koje imaju vrlo široku primjenu u gradnji niskotlačnih plinovodnih mreža, u prvom redu zbog činjenice da je za spajanje potrebno postići daleko više maksimalne temperature toplinskog ciklusa, ali i zbog velikog broja utjecajnih čimbenika. Automatizacija procesa spajanja tehnologijom zavarivanja je također znatno kompleksnija i skuplja u odnosu na spajanje PE-HD cijevi (npr. elektrofuzijskim zavarivanjem). Spajanje cijevi zavarivanjem (pripremno završno + tehnološko vrijeme) je znatno dulje u odnosu na spajanje PE-HD cijevi. Zbog činjenice da je spajanje zavarivanjem uvjetovano vremenskim uvjetima, a vezano rokovima i odgovarajućom kvalitetom i pouzdanosti, pristup tehnologiji zavarivanja je posebno važan kod izgradnje čeličnih plinovoda. U ovom se radu želi obrazložiti tehnologičan pristup zavarivanju čeličnih plinovodnih cijevi tako zvanom «silaznom» tehnologijom zavarivanja (njem. Fallnaht schweissen, engl. Downhill or Downward welding).

### 2. POSTUPCI I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ČELIČNIH PLINOVODNIH CIJEVI

Kod zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi može se koristiti REL (ručno elektrolučno zavarivanje), poluautomatsko MAG (zavarivanje praškom punjenom taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina ili plinske mješavine) i TIG (zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina). TIG postupak se koristi rjeđe zbog povećanih troškova zavarivanja i smanjene produktivnosti, a koristi se za izvođenje korijenih prolaza uz nastavak popune REL postupkom. S obzirom na potrebe zavarivanja u gradnji čeličnih plinovodnih mreža u Republici Hrvatskoj, REL postupak se nametnuo kao tehnologično (isplativo, pouzdano, kvalitetno, ...) rješenje. Ta se tvrdnja zasniva na vrsti i dimenzijama materijala koji se koristi za gradnju cjevovoda, opsegu zavarivačkih radova, rokovima i zahtijevanoj kvaliteti zavarenih spojeva, atmosferskim uvjetima ovoga podneblja i dr.

Zavarivanje čeličnih plinovodnih cijevi izvodi se u vertikalnom položaju, pri čemu se može koristiti dvije tehnike: uzlaznu i silaznu (njem. Fallnaht schweissen, engl. Downhill or Downward welding). Pri REL zavarivanju se koriste celulozne elektrode kod kojih se dopušta

relativno viši sadržaj difuzijskog vodika i bazične elektrode kod kojih nije dopušten viši sadržaj difuzijskog vodika. Bazične elektrode daju kvalitetnija mehanička svojstva i primjenjuju se kod čeličnih cijevi povišene čvrstoće. Rukovanje bazičnim elektrodama je stoga kompleksnije. U tablici 1 daju se tipični sadržaji difuzijskog vodika određeni prema AWS A 4.3:

Tablica 1. Tipični sadržaji difuzijskog vodika određeni prema AWS A 4.3. [1]

Tip elektrode prema AWS/EN	Sadržaj difuzijskog vodika (ml/100 gr. metala zavora)
E 7018/E 42 5 B 4 2 H5	$3 \pm 1,5$
E 6013/E 38 0 RC 11	$34 \pm 4,0$
E 8010/E 46 C	$60 \pm 5,0$

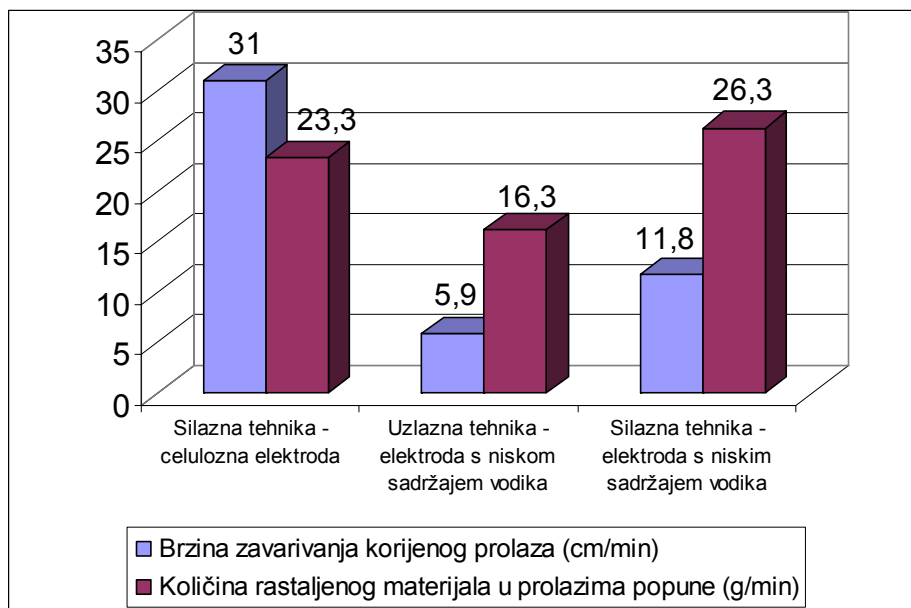
Za zavarivanje tzv. silaznom tehnikom potrebna je iznimna vještina zavarivača koji izvodi zavarivanje pri čemu se koriste odgovarajuće elektrode za silaznu tehniku zavarivanja (celulozne i bazične elektrode), a zavarivanje se izvodi tehnikom povlačenja uz eventualno minimalno njihanje elektrode. Duljina električnog luka je vrlo mala (orijentacijski se radi o visini električnog luka jednakoj promjeru elektrode kojom se zavaruje). Brzina zavarivanja kao i količina depozita u zavaru je veća kod zavarivanja silaznom tehnikom u odnosu na uzlaznu tehniku zavarivanja.

U tablici 2 daje se usporedba tri karakteristične tehnike zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi:

Tablica 2. Usporedba uobičajenih REL tehnika zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi.[2]

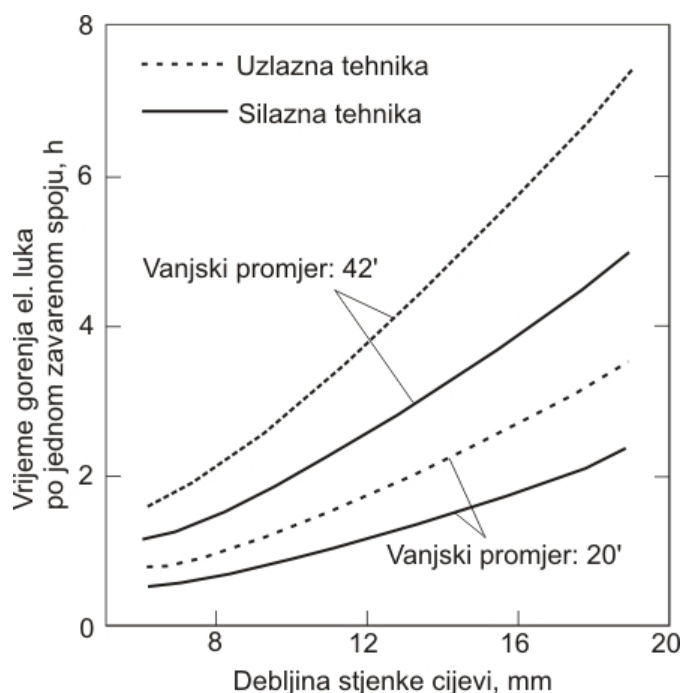
Tehnika REL zavarivanja	Silazna	Uzlazna	Silazna
<b>Tip obloge elektrode</b>	Celulozna	Sa niskim sadržajem vodika	Sa niskim sadržajem vodika
<b>Otpornost na vjetar</b>	Dobro otporna	Otporna do 5 m/s	Otporna do 5 m/s
<b>Visina «nosa» u korijenu</b>	$1,6 \pm 0,8$ mm	$1,4 \pm 1,0$ mm	$1,5 \pm 0,5$ mm
<b>Zazor u korijenu</b>	$1,6 \pm 0,8$ mm	$2,6 \pm 1,0$ mm	$3,0 \pm 0,5$ mm
<b>Denivelacija (smaknuće)</b>	1,6 max. mm	2,0 max. mm	1,0 max. mm
<b>Stabilnost kod provarivanja korijena</b>	Zadovoljavajuća	Veća stabilnost	Manja stabilnost
<b>Praćenje zavarivanja po zvuku</b>	Zadovoljavajuće	Više zvuka – povoljno praćenje	Zadovoljavajuće
<b>Otpornost na hladne pukotine</b>	Niska	Veća	Veća
<b>Brzina zavarivanja korijenog prolaza</b>	Visoka (20 - 50cm/m)	Niža (5 - 8cm/m)	Zadovoljavajuća (10 -15 cm/m)
<b>Količina rastaljenog depozita</b>	Visoka (20-30g/min)	Zadovoljavajuća (15 -20 g/min)	Visoka (20 - 30g/min)

Na slici 1 daje se grafički prikaz usporedbe brzine zavarivanja i količine depozita u jedinici vremena za različite REL tehnike zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi.



Slika 1. Usporedni prikaz pokazatelja produktivnosti za različite tehnike REL zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi. [2]

Na slici 1 se evidentno vide prednosti silazne tehnike zavarivanja celuloznom elektrodom, ali također i silazne tehnike zavarivanja u odnosu na uzlaznu tehniku. Na slici 2 se pokazuje trajanje gorenje električnog luka kod elektroda sa niskim sadržajem vodika, a za primjenjenu silaznu i uzlaznu tehniku zavarivanja.



Slika 2. Trajanje gorenje el. luka kod zavarivanja čeličnih cijevi uz primjenu elektroda sa niskim sadržajem vodika, a za primijenjenu silaznu i uzlaznu tehniku zavarivanja. [2]

Kod zavarivanja čelika povišene čvrstoće potrebno je koristiti bazične elektrode sa nižim sadržajem vodika što je vrlo povoljno u pogledu učinkovitosti silaznom tehnologijom zavarivanja, no to zahtjeva i dodatne troškove rukovanja bazičnim elektrodama koje se koriste kada za to postoji potreba.

### 3. IZBOR REPREZENTANTA - ČELIČNI PLINOVOD NA PLINOVODNOJ TRASI SLAVONSKI BROD - ZAGREB

Kao reprezentant je izabran čelični plinovod koji se trenutno radi na relaciji Slavonski Brod-Zagreb istok. Radi se o čeličnom plinovodu promjera cijevi 24". Debljina cijevi je odabrana po kriteriju lokacijskih faktora područja kojim prolazi cjevovod. U najpovoljnijem slučaju debljina stjenke je 8,8 mm, dok je u neposrednoj blizini naseljenih mjesta i auto ceste debljina stjenke cijevi je 10.3 mm, a na posebnim mjestima 12.9 mm. Na slici 3 se prikazuje čelična plinovodna cijev koja se polaže u zemlju izvan naseljenog područja. Na slici su uočljivi osnovni podaci o cijevi (promjer, debljina stjenke, vrsta osnovnog materijala, duljina, tip PE-HD obloge i dr.), kao o spiralni tvornički izvedeni EPP zavareni spoj. Također se može uočiti površinska zaštita sa unutrašnje strane kao i PE-HD s vanjske strane cijevi.

Maksimalni projektirani radni tlak cjevovoda je 70 bar-a, predviđeni vijek eksploatacije cjevovoda je 50 godina, dok je ispitni tlak pri vodenoj tlačnoj probi 113 bar-a. Prije polaganja pojedinih segmenata cjevovoda u zemlju, segmenti čija se duljina može kretati od stotinjak metara pa naviše, ispituju se na nepropusnost zrakom pod tlakom od 6 bara. Cijevi od kojih se izrađuju segmenti su tvornički spiralno zavarene EPP postupkom (izrađuju se u Turskoj), a duljina im se kreće najčešće u orijentacijskom rasponu od 14 do 18 m. Izuzev u području gdje će se izvoditi spajanja cijevi zavarivanjem, cijevi su obložene slojem PE-HD koji daje korozijsku postojanost cijevi sa vanjske strane. Iznutra su cijevi također zaštićene površinskom zaštitom, izuzev u području usko uz mjesto zavarivanja cijevi.



Slika 3. Čelična plinovodna cijev (X70) promjera 24" i debljine stjenke 8.8 mm.

#### 3.1. Osnovni podaci o osnovnom materijalu

U tablici 3 su prikazani čelici specificirani prema API 5L (American Petroleum Institute) od koji se gradi plinovodna mreža:

Tablica 3. Tipovi čelika za plinovodne cijevi specificirano prema API 5L. [2]

Oznaka	Naprezanje tečenja ksi (N/mm <sup>2</sup> )	Rastezna čvrstoća ksi (N/mm <sup>2</sup> )
A25	25 (172) min	45 (310) min
A	30 (207) min	48 (331) min
B	35 (241) min	60 (413) min
X42	42 (289) min	60 (413) min
X46	46 (317) min	63 (434) min
X52	52 (358) min	66 (455) min
X56	56 (386) min	71 (489) min
X60	60 (413) min	75 (517) min
X65	65 (448) min	77 (530) min
<b>X70</b>	<b>70 (482) min</b>	<b>82 (565) min</b>
X80	80 (551) min	90-120 (620-827)
X100		

U tablici 4 daje se sadržaj kemijskih elemenata za odabrani čelik X70

Tablica 4. Sadržaj kemijskih elemenata u osnovnom materijalu čelične cijevi:[3]

Oznaka čelika	Ugljik (max.)	Mangan (max.)	Fosfor (max.)	Kobalt (min.)
X70	0,23	1,60	0,04	0,05

Za svako smanjenje od 0,01 % ugljika ispod specificirane maksimalne vrijednosti, porast od 0,05 % mangana iznad specificirane maksimalne vrijednosti je dopušten.

### 3.2. Osnovni podaci o dodatnom materijalu

Za zavarivanje korijenog zavara uzlaznom tehnikom korištena je celulozna elektroda Fox Cel  $\phi$  3,25 mm. Za popunu žlijeba je korištena celulozna elektroda Fox Cel 90  $\phi$  4 mm. Sadržaj kemijskih elemenata i osnovna mehanička svojstva odabranih dodatnih materijala vidljivi su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Sadržaj kemijskih elemenata u korištenim celuloznim elektrodama. [4]

Oznaka elektrode	C	Si	Mn	Mo	Ni
Fox Cel	0,12	0,14	0,5	-	-
Fox Cel 90	0,14	0,14	0,8	0,10	0,6

Tablica 6. Osnovna mehanička svojstva korištenih celuloznih elektroda. [4]

Oznaka elektrode	Granica razvlačenja, MPa		Rastezna čvrstoća, MPa		Izduljenje, A <sub>5</sub> , %		Radnja loma, J	
	Nomin.	Minim.	Nomin.	Minim.	Nomin.	Minim.	Nomin.	Minim.
Fox Cel	450	390	520	430	26	23	110	70
Fox Cel 90	610	530	650	620	21	19	85	70

### 3.3. Proračun debljine stjenke čelične plinovodne cijevi

Čelična plinovodna cijev izrađena iz trake određene debljine, a spojene spiralnim oblikom EPP zavarenog spoja. Cijevi se međusobno spajaju kružnim zavarenim spojem koji je sa

stajališta naprezanja dvostruko povoljniji od uzdužnog zavarenog spoja. No, zbog tehnologije izrade cijevi (zavarivanje spiralnim EPP zavarom), za proračun debljine stjenke se koristi formula za proračun cilindričnih cijevi pod tlakom: [5]

$$s = t = \frac{D \cdot p}{20 \cdot S}, \text{ mm}$$

gdje je:

$p$  ... ispitni tlak u barima (za odabrani reprezentant  $p = 113$  bara)

$S$  ... npr. 90 % od minimalne specificirane granice razvlačenja u  $\text{N/mm}^2$

$t, s$  ... nazivna debljina stjenke u mm

$D$  ... nazivni vanjski promjer cijevi u mm (za odabrani reprezentant 24 ')

Napomena:  $S = \frac{R_{p0,2}}{SF} \cdot V$

gdje je:

$SF$  ... faktor sigurnosti

$V$  ... faktor slabljenja osnovnog materijala zbog prisutnosti zavarenog spoja

$R_{p0,2}$  ... konvencionalna granica razvlačenja, MPa

Faktor sigurnosti se mijenjao ovisno o lokaciji (mjesto izvan naselja, naseljena mjesta, neposredna blizina autoceste, specijalna mjesta: prijelazi ispod rijeka, ceste, ...). Ovisno o faktoru sigurnosti, debljina stjenke je bila 8,8; 10,3 i 12,9 mm.

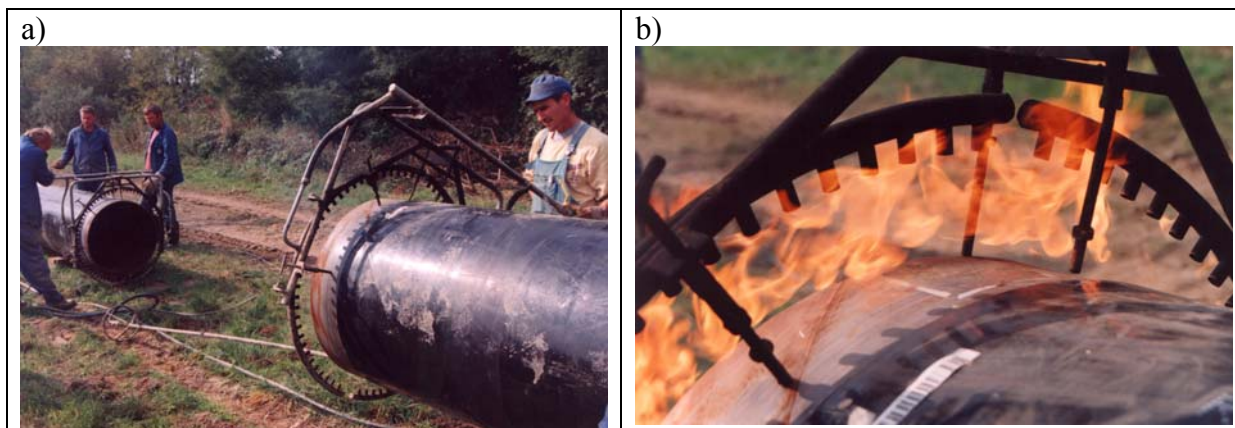
### 3.4 Slijed aktivnosti kod zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi

Slijed aktivnosti kod zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi ovisi o tome da li se izvodi zavarivanje na otvorenoj trasi ili zavarivanje u zavarivačkoj jami (spajanje dva dijela cjevovoda nakon polaganja u zemlju). Najvećim dijelom je zastupljeno zavarivanje na otvorenoj trasi, nakon čega se cjevovod određene duljine polaže u zemlju i spaja sa preostalim dijelom cjevovoda.

Slijed aktivnosti zavarivanja čeličnog plinovoda sastoji se od:

1. čišćenja čelične cijevi od nečistoća u području zavarenog spoja (brusilica),
2. predgrijavanje plinskim plamenom na potrebnu temperaturu (u odabranom primjeru temperatura predgrijavanja bila je  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ),
3. pozicioniranje cijevi koje se zavaruju,
4. izvođenje korijenog zavara, te čišćenje zavara od šljake brušenjem,
5. izvođenje zavarenih prolaza 2-4 (5) uz čišćenje šljake nakon izvođenja svakog zavara
6. oblaganje zavarenog spoja toplinskom izolacijom radi sporog hlađenja zavara

Detalj predgrijavanja prikazan je na slici 3 i slici 4, a izvodi se propan/butan plinom.



Slika 4. Detalji vezani uz predgrijavanje cijevi prije zavarivanja: slika a – priprema gorionika, slika b – detalj tijekom trajanja predgrijavanja.

Pozicioniranje čeličnih plinovodnih cijevi izvodi se pomoću hidraulične naprave. Detalj pozicioniranja je prikazan na slici 5.



Slika 5. Detalj pozicioniranja čeličnih plinovodnih cijevi neposredno pred zavarivanje

Kod tzv. specijalnih mjesta kao što su prijelazi ispod ceste, kanala i nasipa koriste se tzv. uvodne cijevi u koje se smješta radna cijev koja je tvornički obložena slojem posebne betonske mješavine. Nakon spajanja čeličnih cijevi zavarivanjem, prostor između uvodne i radne cijevi obložene slojem betonske mješavine, popunjava se betonskom mješavinom pod tlakom. Uvodne cijevi mogu biti različitih dimenzija, pa su tako na razmatranoj dionici duljine uvodnih cijevi bile i do 70 m. Na slici 6 se prikazuje uvodna cijev ispod nasipa na rijeci Česmi (u blizini Popovače).



Slika 6. Zavarivanje radne cijevi koja dolazi iz uvodne cijevi kroz riječni nasip (desna strana) sa radnom cijevi koja ide min. 1,5 m ispod riječnog korita rijeke Česme (lijevo).

### 3.5. Primijenjene tehnike zavarivanja

Kod zavarivanja čeličnih plinovodnih cijevi može se uočiti nekoliko pristupa zavarivanju, ovisno o vrsti i promjeru osnovnog materijala, ali i o osposobljenosti izvođača radova zavarivačkim kadrom. Za spomenuti reprezentant, gdje se susreće 5 izvođača radova, može se uočiti nekoliko varijanti tehnologije zavarivanja čeličnih cijevi promjera 24", a debljine stjenke 8.8 do 12.9 mm:

- A. Korijen celulozna elektroda (vertikalno silaznom ili uzlaznom tehnikom) + 4(5) sloja popune žlijeba celuloznom elektrodom vertikalnom (FALLNAHT) tehnikom.
- B. TIG korijen + 4 sloja popune celuloznom elektrodom vertikalnom (FALLNAHT) tehnikom.

U tehnici zavarivanja je uobičajeno da se zavarivanje u vertikalnom položaju izvodi odozdo prema gore. To je prije svega zbog činjenice da se zavarivačka šljaka slijeva prema dolje i na taj način neće dospjeti u žlijeb zavarenog spoja tijekom zavarivanja i ostati tamo u obliku greške. Kod celuloznih elektroda i bazičnih elektroda predviđenih za zavarivanje silaznom tehnikom, moguće je zavarivati u vertikalnom položaju odozgor prema dolje (FALLNAHT tehnika), a da pri tome izbjegne slijevanja zavarivačke šljake u žlijeb za zavarivanje.

Bilo da se radi o kojoj varijanti A ili B spomenutih varijanti zavarivanja, zavarivanje izvode istovremeno dva zavarivača. Orijentacije radi, kod izrade odabranog cjevovoda po varijanti A,



10 zavarivača (radeći po dva u paru istovremeno) mogu u jednoj smjeni zavariti i do 35 cijevi. Tehnološko vrijeme zavarivanja je prosječno 45 min, dok je kompletno zavarivanje jednog spoja prosječno 2 sata (predgrijavanje, pozicioniranje, ...). Varijanta B zahtjeva nešto dulje zavarivanje zbog povećanog zazora u korijenu cijevi za TIG provarivanje, te sporijeg TIG postupka u odnosu na REL, a i zbog povećanja ploštine presjeka zavarenog spoja po ovoj varijanti. Orijetacijski u jednoj smjeni 6 zavarivača zavari do 15 cijevi spomenutog promjera. Kod zavarivanja celuloznim elektrodama REL postupkom istosmjernom strujom (DC) kod korijenog zavare je elektroda bila spojena na «-» pol, dok je kod ostalih prolaza i slojeva bila spojena na «+» pol.

Prije zavarivanja osnovni materijal se predgrijava na temperaturu od 150 °C. Temperatura između prolaza ne smije preći 300 °C. Nakon zavarivanja se zavareni spoj oblaže toplinskim izolatorom radi sporijeg hlađenja. Detalj zavarivanja čeličnog plinovodnog cjevovoda promjera 24', debljine stjenke 8,8 mm celuloznom elektrodom promjera 4 mm, uz istovremeno zavarivanje dva zavarivača je prikazan na sljedećoj slici:



Slika 7. Detalj zavarivanja čelične plinovodne cijevi «fallnaht tehnologijom».

Izgled kvalitetno izvedenog zavarenog spoja prikazan je na slici 8.

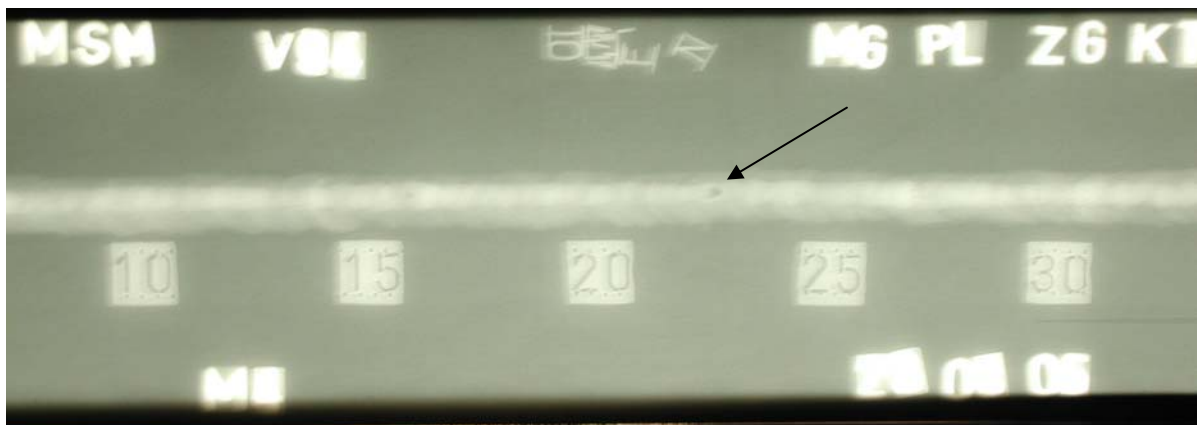


Slika 8. Izgled zavarenog spoja sa strane lica zavara izveden silaznom REL tehnikom zavarivanja uz korištenje celulozne elektrode.

#### 4. Kvaliteta i pouzdanost zavarenih spojeva

Kriteriji prihvatljivosti kvalitete zavarenih spojeva su oni koji vrijede za klasu B i C sukladno HRN EN 25817 (ovisno o tipu pogreške!). Po klasi C sukladno prema navedenom standardu tretiraju se manje opasne pogreške kao što su: poroznost, manji nedostatak provara u korijenu zavara, manje naljepljivanje u korijenu i sl.

Opseg primjene KBR-a ovisi o lokacijskim faktorima cjevovoda, a kreće se od 20 % do 100 % za radiografsku metodu kontrole kvalitete. U naseljenim mjestima i na specijalnim mjestima (prijelazi ispod autoceste, rijeka i sl.) primjenjuje se 100 % radiografska kontrola.



Slika 8. Primjer radiograma zavarenog spoja

Dosadašnje praćenje kvalitete zavarenih spojeva (približno 7500 kružnih zavarenih spojeva na potezu Slav. Brod – Kutina) je pokazalo da je kvaliteta zavara iznad očekivane, posebice imajući u vidu vremenske uvjete u kojima se izvodilo zavarivanje.

## Literatura

1. Perteneder, E.,Konigshofer,H.,Bischof R. Properties of modern filler materials for welding of pipelines at construction sites. Zavarivanje br. 1/2, 2004., str. 17-23.
2. [www.kobelco.co.jp/english/welding/files/v4n3,3-7.pdf](http://www.kobelco.co.jp/english/welding/files/v4n3,3-7.pdf). Shielded Metal Arc Welding in Transportation Pipelines. Tehnical report
3. xxxxx Petroleum material. Trouvay &Cauvin worldwide organization. 76097 Le Havre Cedex (France), 1989., pg. 1-41.
4. Katalog proizvođača dodatnog materijala za zavarivanje Bohler.
5. Projektna dokumentacija za izradu cjevovoda

## Zahvala.

Tijekom izrade ovoga rada i upoznavanja sa specifičnostima izrade čeličnih plinovodnih cijevi, autori su u nekoliko navrata obilazili gradilišta na potezu Kutina-Popovača. Autori koriste priliku da zahvale svim sudionicima u projektu gradnje čelične plinovodne mreže, a posebno gospodi: Vladimir Đurović dipl.ing. direktor tvrtke Plinacro d.o.o., Mirku Miškiću dipl.ing. Plinacro d.o.o., Dragomiru Đakoviću dipl.ing. EWE odgovornoj osobi za nadzor zavarivačkih radova, Mariju Čuriću dipl.ing.EWE odgovornoj osobi za nadzor strojarskih radova, Siniši Kovačeviću dipl.ing. EWE i Zdravku Smodeku dipl.ing. iz tvrtke Monter-Strojarske montaže d.d. i svima ostalima koji su nam pomogli na bilo koji način, a ovdje nismo spomenuli njihova imena.