

Zavarivanje čeličnih cjevovoda za transport vodika

Fusić, Jan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:708717>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jan Fusić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Jan Fusić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću za stručne savjete i pomoć tijekom izrade završnog rada.

Posebno se zahvaljujem roditeljima, braći i prijateljima na neizmjernoj podršci koja je učinila moje studentske dane ljepšima i sretnijima.

Jan Fusić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jan Fusić** JMBAG: **0035232457**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zavarivanje čeličnih cjevovoda za transport vodika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Welding of steel pipelines for hydrogen transport**

Opis zadatka:

Transport vodika cjevovodima pod visokim tlakom predstavlja značajan problem zbog utjecaja medija na područje zone zavarenog spoja. U teorijskom dijelu, na temelju pregleda literature definirati osnovne mehanizme djelovanja vodika na zonu zavarenog spoja te specificirati kritične mikrostrukture. Dati pregled čelika za izgradnju cjevovoda prema zahtjevima norme API 5L te opisati postupke zavarivanja koji se danas primjenjuju s posebnim osvrtom na automatizirano zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu, na temelju mehaničkih karakteristika zavarenog spoja načinjenog postupcima 135 i 136 automatskim zavarivanjem na cijevi D406,4x25 mm ocijeniti prikladnost tehnologije za izradu cjevovoda za transport vodika. Posebno analizirati tvrdoću i makrostrukturu spoja. Zaključno, donijeti preporuke o prilagodbi postojeće tehnologije za tzv. „hydrogen ready“ cjevovodne sustave.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. VODIK	2
2.1. Potencijal	2
2.2. Distribucija	3
3. OSNOVNI MEHANIZMI DJELOVANJA VODIKA	5
3.1. Vodikova krhkost	8
3.2. Vodikom indicirane pukotine	8
3.3. Hladne pukotine	9
3.4. Zakašnjele pukotine	10
4. KRITIČNE MIKROSTRUKTURE	11
4.1. Mikrostrukture	11
4.2. Metalurgija zavarenog spoja	13
5. ČELICI ZA IZGRADNJU CJEVOVODA PREMA NORMI API 5L	15
5.1. Norma API 5L	15
5.2. Gradacija čelika X70	16
6. AUTOMATSKI POSTUPCI ZAVARIVANJA CJEVOVODA	18
6.1. Opasnost od pukotina	20
6.2. Oprema	21
6.3. Razvijanje i inovacije	22
6.4. Postupak automatskog zavarivanja	23
6.4.1. Priprema spoja	23
6.4.2. Zavarivanje korijena i vrućeg prolaza	23
6.4.3. Zavarivanje popune i završnih prolaza	23
6.5. Postupak 135	24
6.6. Postupak 136	24
7. EKSPERIMENTALNI DIO	26
7.1. Dobiveni rezultati	26
7.1.1. Radiografsko ispitivanje	26
7.1.2. Analiza makroizbruska	27
7.1.3. Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10	27
7.1.4. Statičko vlačno ispitivanje	28
7.1.5. Ispitivanje žilavosti metala zavara	29
7.1.6. Ispitivanje na savijanje	30

7.2. Potrebna svojstva	30
7.2.1. Testiranje zavara	31
7.3. Usporedba rezultata	31
7.3.1. Ispitivanje tvrdoće.....	31
7.3.2. Ispitivanje udarnog rada loma	32
7.3.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava	32
7.3.4. Ispitivanje kemijskih svojstava	32
7.3.5. Ostali zahtjevi u normi ASME B31.12.	33
8. ANALIZA REZULTATA.....	34
9. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1. Proces dobivanja i distribucije vodika [1].....	2
Slika 3. Dužina postojećih i planiranih cjevovoda za transport vodika u svijetu [3].....	4
Slika 4. Rastvorljivost vodika u željezu ovisno o tlaku i temperaturi [8].....	5
Slika 5. Preduvjeti za nastanak oštećenja uzrokovanih djelovanjem mehanizma vodika [7].....	6
Slika 6. Hladne pukotine u zavarenom spoju [12]	10
Slika 7. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja A – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; B - kutni spoj, pukotina u ZUT-u; C – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; D – sučeljeni spoj, pukotina iz neprovarenoga korijenja zavara [11].....	10
Slika 8. Prikaz zavarivačkog TTT dijagrama [10]	11
Slika 9. Difuzija vodika iz područja metala zavara u područje zone utjecaja topline za vrijeme zavarivanja [7].....	12
Slika 10. Shematski prikaz zavarenog spoja.....	13
Slika 11. ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika s 0,2 %C [15]	14
Slika 12. Označavanje čelika za izgradnju cjevovoda prema normi API 5L [8]	15
Slika 13. Kronološki razvoj čelika za cjevovode [15].....	16
Slika 14. Prikaz kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika X70 prema standardima API i EN 10 208-2 u usporedbi s podacima iz prakse [16]	17
Slika 15. Usporedba učina taljenja pri ručnom, poluautomatskom i automatskom zavarivanju [18]	18
Slika 16. Ovisnost temperature predgrijavanja o CE za MAG postupak [18].....	20
Slika 17. Shematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje cjevovoda [17]	22
Slika 18. Presjeci praškom punjenih žica [19]	25
Slika 19. Makroizbrusak epruvete [21]	27
Slika 20. Lokacije mjerenja tvrdoće na uzorku [21]	27
Slika 21. Uzorak epruvete nakon statičnog vlačnog ispitivanja [21]	28
Slika 22. Uzorci nakon ispitivanja žilavosti metala zavara [21].....	29
Slika 23. Uzorci nakon ispitivanja bočnog savijanja [21]	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati ispitivanja tvrdoće	28
Tablica 2. Rezultati statičnog vlačnog ispitivanja	28
Tablica 3. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma metala zavara	29
Tablica 4. Zahtjevani kemijski sastav materijala S355J2H	32
Tablica 5. Kemijski sastav materijala S355J2H prema certifikatu [22]	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	Promjer
H _D	ml H ₂ /100g	Sadržaj difundiranog vodika
R _{p0,2}	MPa	Granica razvlačenja
R _m	MPa	Vlačna čvrstoća
CE	%	Ekvivalent ugljika prema IIW
a ₀	mm	Početna debljina poprečnog presjeka epruvete
b ₀	mm	Početna širina poprečnog presjeka epruvete
S ₀	mm ²	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
F _m	N	Maksimalna sila
B	mm	Širina epruvete za ispitivanje žilavosti
W	mm	Visina epruvete za ispitivanje žilavosti
L	mm	Duljina epruvete za ispitivanje žilavosti

SAŽETAK

U teorijskom dijelu objašnjeno je zašto je baš vodik aktualan u energetskej tranziciji i zašto se kod distribucije medija javljaju značajni problemi na područja zona zavarenih spojeva. Objasnjeni su njegovi mehanizmi djelovanja za zonu zavarenog spoja te kritične mikrostrukture. Prikazati su čelici za izgradnju cjevovoda prema zahtjevima norme API 5L s naglaskom na čelik X70 koji se najviše koristi te je dan pregled automatskih postupaka zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na temelju mehaničkim karakteristika zavarenog spoja načinjenog postupkom 135 automatskim zavarivanjem na cijevi D406,4x25 mm ocjenjena je prikladnost tehnologije za transport vodika. Posebno su analizirane tvrdoća i makrostruktura spoja te je na kraju dana preporuka o prilagodbi postojeće tehnologije za tzv. „hydrogen ready“ cjevovodne sustave.

Ključne riječi: vodik, automatsko zavarivanje, cjevovodi

SUMMARY

In the theoretical part, the relevance of hydrogen in the energy transition is explained, along with significant challenges in the distribution of the media in the areas of welded joints. The operating mechanisms for the welded joint zone and critical microstructures are elucidated. Steels for pipeline construction according to API 5L standards are presented, with a focus on X70 steel which is most commonly used, along with an overview of automatic welding procedures.

In the experimental section, based on the mechanical characteristics of a welded joint made by the automatic welding process 135 on a pipe of D406.4x25 mm, the suitability of the technology for hydrogen transport is evaluated. The joint's hardness and macrostructure are specifically analyzed, and recommendations for adapting the existing technology for "hydrogen-ready" pipeline systems are provided.

Keywords: hydrogen, automatic welding, pipelines

1. UVOD

U današnjem svijetu gdje tehnološki napredak eksponencijalno raste, suočavamo se s izazovima na koji način proizvodimo energiju. Unatoč stalnim inovacijama, još se uvijek većina industrije oslanja na tradicionalne izvora energije poput fosilnih goriva. Oni su često glavni krivci energetske problema današnjice poput emisije stakleničkih plinova, onečišćenja zraka, nestabilnosti energetske tržišta i ograničenih resursa.

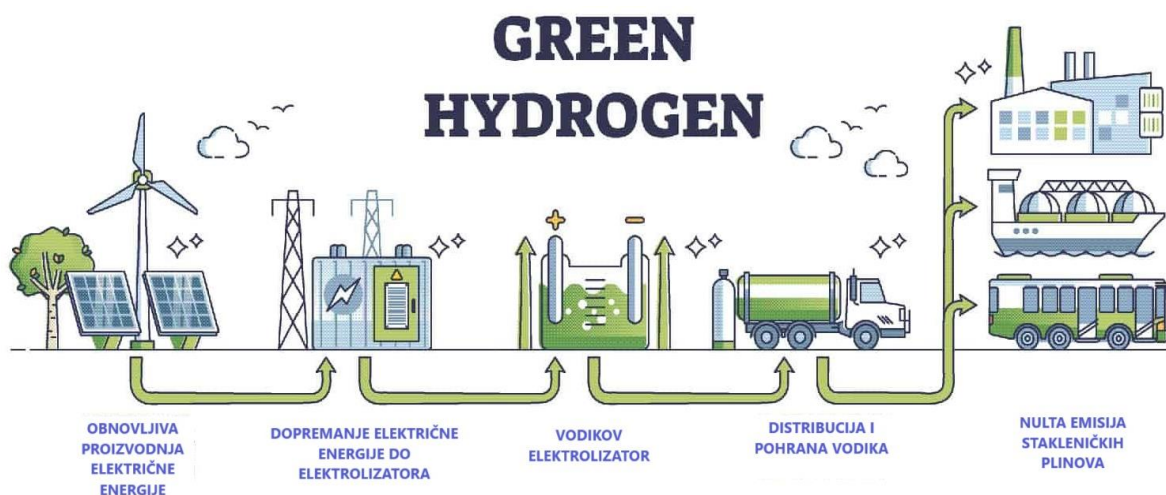
Rezultat tome je neodrživa energetska budućnost s ozbiljnim posljedicama po okoliš i čovjekovo zdravlje. Kao svjetla točka pojavljuje se vodik koji se sa svojim potencijalom za čisti izvor energije ističe kao jedan od glavnih energenata budućnosti. U radu je objašnjeno zavarivanje cjevovoda za transport vodika kroz širi kontekst zelene energetske tranzicije.

2. VODIK

2.1. Potencijal

Vodik je najlakši i najjednostavniji kemijski element pa zauzima prvo mjesto na periodnom sustavu elemenata. Pri standardnim uvjetima tlaka i temperature plin je bez mirisa i okusa, bezbojan, neotrovan, ali i vrlo zapaljiv.. Iako se na Zemlji elementarni vodik nalazi u izrazito malim količinama, najzastupljeniji kemijski spojevi u kojima vodik prevladava su voda i ugljikovodici, dakle „neograničene“ količine dostupne u spojevima. Ima malu gustoću u odnosu na druge plinove, no velika prednost mu je velika ogrjevna vrijednost koja za posljedicu ima oslobađanje velike količine energije kod zapaljenja i eksplozije plina. Baš zato je jako zanimljiv i ima velik potencijal da postane „gorivo budućnosti“.

Idealni nastanak vodika objašnjen je pod pojmom „green hydrogen“. To je kada se iz obnovljivih izvora energije dobiva električna energija koja se koristi za elektrolizu vode iz koje nastaju vodik i kisik. U slici dolje objašnjen je proces dobivanja vodika te iskorištavanje tog vodika u različite sektore bez emisije štetnih stakleničkih plinova. Na slici 1. prikazan je proces dobivanja i distribucije vodika.



Slika 1. Proces dobivanja i distribucije vodika [1]

Smatra čistim energentom te će kao takav imati važnu ulogu u puno raznih sektora (energetika, promet, industrija, poljoprivreda i dr.) s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova. Očekuje se da će ulaganja u čiste tehnologije povezane s vodikom pridonijeti transformaciji energetskega sektora u sektor niskih, a u budućnosti i nultih emisija stakleničkih

plinova. U slučaju električne energije, vodik će igrati važnu ulogu kao rješenje za pohranu (skladištenje) što će rezultirati većom proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora energije. Također, u podsektoru grijanja i hlađenja vodik će biti održiva alternativa za zamjenu fosilnih goriva. U sektoru prometa, vodik je jedno od alternativnih i komplementarnih rješenja za električnu mobilnost, posebno za cestovni teretni promet, uključujući gradsku logistiku, cestovni i željeznički prijevoz putnika i robe te pomorski, riječni i zračni promet. [2]

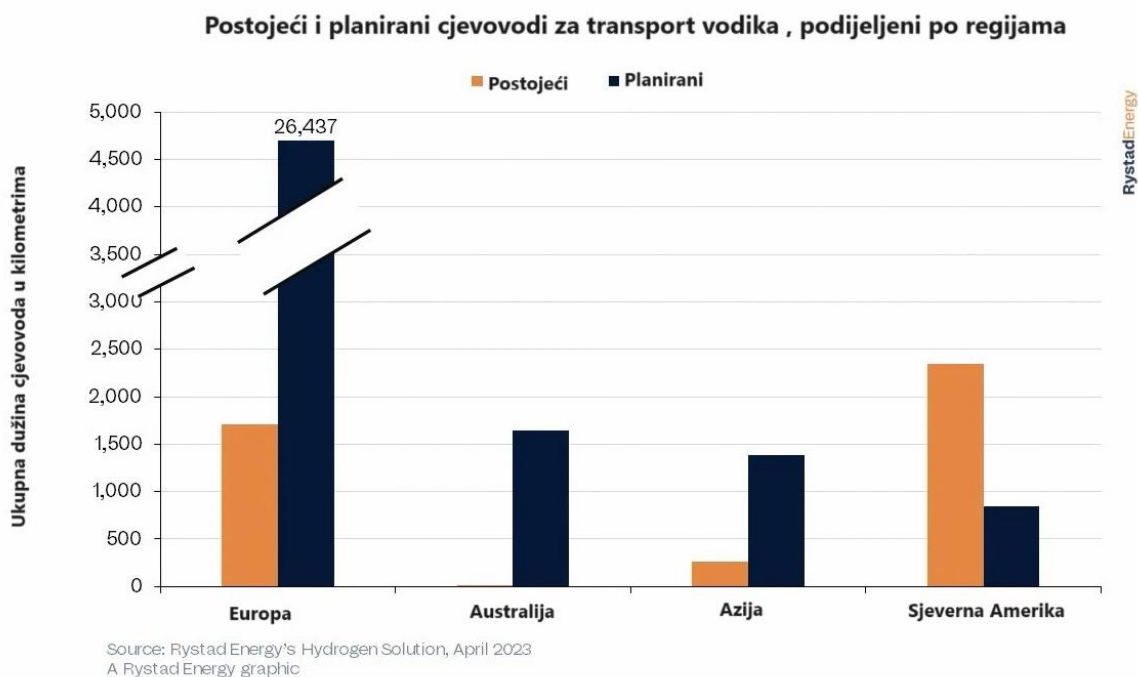
Korištenje vodika kao izvora energije suočava se s izazovima poput visokih troškova, nedovoljne isplativosti izdvajanja vodika iz spojeva te problema curenja zbog izuzetno male molekulske veličine. To svojstva omogućuje vodiku da difundira kroz materijale, uključujući metale, što može narušiti svojstva kristalne rešetke. Mogu se smanjiti žilavost i povećati krhkost metala što uvelike utječe na lom materijala. Kod loma moguća je eksplozija smjese vodika i zraka ukoliko smjesa dođe u kontakt s izvorom paljenja. Treba obratiti pozornost na razna opterećenja koja se javljaju s površine i smetnje koje mogu izazvati neovlašteni radovi na lokaciji cjevovoda, jer je veličina utjecaja vodika na cjevovod ovisna o tlaku vodika, ali i frekvenciji opterećenja. Sve to utječe na čovjekovu sigurnost i ozbiljne nesreće. S aspekta sigurnosti, potrebno je riješiti sve tehničke zahtjeve jer je to ključno za sigurno i održivo usvajanje vodika u energetske sektorima budućnosti.

2.2. Distribucija

Distribucija vodika ovisi o količini koja se isporučuje i udaljenosti koju treba prijeći. Opcije za siguran i pristupačan prijevoz uključuju cestovni, željeznički ili cjevovodni transport, dok se opcije poput prijevoza brodovima, posebice na oceanskim udaljenostima, još uvijek ispituju i testiraju.

U ovom radu fokus je na transportu cjevovodima koje u Europi započinje sredinom 20. stoljeća u Njemačkoj. Danas je u Europi oko 1600 km mreža cjevovoda za transport vodika koja je najviše na području zapadne Europe a posebno državama Beneluksa, Francuske i Njemačke. Također, neke države, kao što su Velika Britanija i Švedska, posjeduju cjevovode za transport vodika manjih duljina. Zbog veće mreže cjevovoda za prirodni plin i brojnih problema koji nastaju zbog difundiranja čistog vodika, često se distribuira u mješavini sa prirodnim plinom sve dok je udio vodika u smjesi manji od 20 %. Europska Unija je pokrenula niz inicijativa za rješavanje sigurnosnih pitanja i razvoja općih pravilnika za izgradnju i korištenje cjevovoda za transport vodika, na temelju iskustva stečenog pri radu s prirodnim plinom. Dvije vodeće svjetske kompanije u transportu vodika trenutno su Air Liquide iz

Francuske i Air Products iz SAD-a, s većinskim vlasništvom nad većinom cjevovoda za transport vodika. Ostale tvrtke često upravljaju manjim mrežama cjevovoda unutar svojih proizvodnih pogona ili dijele kraće dionice cjevovoda dužine nekoliko kilometara. Većina transporta vodika odvija se prema velikim kemijskim postrojenjima ili rafinerijama. Postoji i mogućnost transporta do stambenih potrošača zbog izvora energije i punionica automobila na pogon vodika, no to još uvijek nije isplativo.

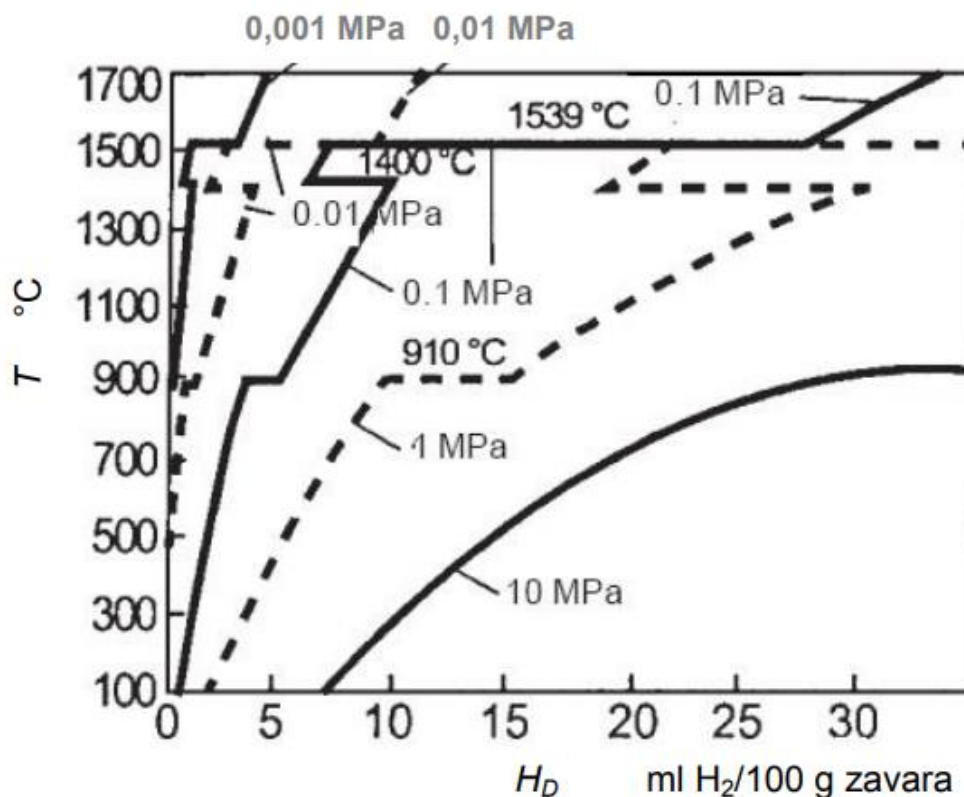


Slika 2. Dužina postojećih i planiranih cjevovoda za transport vodika u svijetu [3]

3. OSNOVNI MEHANIZMI DJELOVANJA VODIKA

Atom vodika ima najmanji promjer (0,029 nm) i najjednostavniju elektronsku strukturu od svih elemenata periodnog sustava, pa se lako apsorbira kao intersticijski element ili u disociranom obliku kao H^+ [4]. Vodik može ući u zonu zavarenog spoja iz različitih izvora, a neki od njih uključuju procese poput zavarivanja, bojanja, kemijskog čišćenja površine, korozije, galvanizacije i slično [5]. Kod samog zavarivanja vodik može biti u osnovnom metalu (prilikom proizvodnje ili prerade materijala), dodatnom materijalu (elektroda ili žica), organskim spojevima na metalu (masti, ulja, prljavštine, nečistoće), zaštitnom plinu i vlazi iz atmosfere.

Topljivost vodika u željezu uvelike ovisi o tlaku i temperaturi. Očekuje se da će transportni cijevovodi će raditi pod tlakom do 20 MPa (3.000 psi), pri od 150°C ili nižim [6]. S porastom temperature raste i topivost vodika. Kod brzog hlađenja taline nakon zavarivanja dešavaju se promjene faza kod temperaturnih transformacija $\delta \rightarrow \gamma$ i $\gamma \rightarrow \alpha$ što isto utječe na topivost. Legirajući elementi u tekućem željezu također imaju utjecaja. S dodatkom Ni, Mn, Cr i Nb topivost raste, a s dodatkom C, Sn, Ge, Si, B, Al i Mo opada [7].



Slika 3. Rastvorljivost vodika u željezu ovisno o tlaku i temperaturi [8]

Vodik ulazi u metal na dva načina: putem plinske i tekuće faze [4]. U plinskoj fazi, proces uključuje adsorpciju vodikovih molekula na površinu metala, disocijaciju molekula vodika u atome koji se adsorbiraju na površinu te transport kroz kristalnu rešetku metala putem mehanizma difuzije. S druge strane, u tekućoj fazi, vodik ulazi u metal putem elektrokemijskih reakcija koje uključuju razvijanje vodika na površini metala. Međutim, u kontekstu cjevovoda, vodik se obično transportira u stlačenom plinovitom stanju, budući da prelazi iz plinovitog u tekuće stanje na temperaturi od $-252,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Oštećenja u metalu nastala uslijed djelovanja atoma vodika ponekad su potpomognuta radnim naprezanjima i unutrašnjim napetostima u materijalu, a ispoljavaju se kao krhki lom, smanjenje duktilnosti, pojava površinskih blistera (mjehuričavost), stvaranje hidrida itd. [9].

Preduvjeti za nastanak oštećenja uzrokovanih vodikom kod zavarenih spojeva uključuju [9,10]:

1. **Dovoljna koncentracija vodika u materijalu:** To je općenito izraženo u pojmu inicijalnog difundiranog vodika (H_D).
2. **Osjetljiva mikrostruktura:** Igra ključnu ulogu poput ferita, martenzita/austenita, bainita.
3. **Razina naprezanja u materijalu:** Prisutnost naprezanja, izražena kroz zaostala naprezanja, često je jednaka stvarnim veličinama naprezanja.
4. **Temperaturno područje između 200 i $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:** Oštećenja uzrokovana vodikom često se javljaju u određenom temperaturnom rasponu.
5. **Vrijeme:** Procesi difuzije vodika i nastanak oštećenja zahtijevaju određeno vremensko razdoblje.



Slika 4. Preduvjeti za nastanak oštećenja uzrokovanih djelovanjem m mehanizma vodika [7]

Postoje različite teorije koje opisuju pojave oštećenja i pukotina uslijed prisustva vodika [7]:

1. **Teorija porasta tlaka vodika u plinovitom stanju:** Atomni vodik ulazi u mikrošupljine i nepravilnosti, što dovodi do spajanja u molekularni vodik. Ovaj proces rezultira porastom tlaka, posebno za feritne čelike gdje ti tlakovi mogu dostići izuzetno visoke vrijednosti (10^6 do 10^7 bara). Ovi povišeni tlakovi mogu uzrokovati lokalne pukotine i proširenje postojećih nehomogenosti u strukturi.
2. **Teorija smanjenja površinske energije:** Adsorpcija vodika uz vrh pukotine smanjuje efektivnu površinsku energiju metala, što rezultira smanjenjem količine energije potrebne za širenje pukotine. Prema Griffithovoj teoriji, pod ovim uvjetima pukotina može nastati pri nižim naprezanjima uz prisustvo vodika.
3. **Teorija smanjenja otpora klizanja (eng. Slip softening) ili teorija interakcija između nepravilnosti i lokalne strukture:** uzima u obzir eksperimentalna saznanja da uzorci koji imaju određenu količinu vodika imaju niže naprezanje tečenja od uzoraka u kojima nema vodika.
4. **Teorija dekohezije:** Ova teorija opisuje utjecaj rastvorenog vodika u rešetki metala na čvrstoću veza između pojedinih atoma. Oslabljenje tih veza u konačnici dovodi do pojave pukotine u materijalu.
5. **Teorija stvaranja hidrida:** Prema ovoj teoriji, nastaje stvaranje krhkih hidridnih spojeva na vršku pukotine. Pod naprezanjem, ti hidridni spojevi mogu izazvati širenje pukotine u materijalu.
6. **Teorija napada vodika:** Ova teorija opisuje mehanizam razugljičenja čelika i ovisi o faktorima poput temperature, vremena i parcijalnog tlaka vodika. Ovo može rezultirati oslabljivanjem materijala i pojavom pukotina.

Najčešća oštećenja koja može prouzročiti vodik su [7]:

- vodikova krhkost (HE – Hydrogen Embrittlement),
- vodikom inducirane pukotine (HIC - Hydrogen Induced Cracking, HACC – Hydrogen Assisted Cold Cracking),
- pukotine izazvane povećanjem tlaka uslijed prisutnosti vodika (HPIC – Hydrogen Pressure Induced Cracking),

- lom materijala izazvanog vodikom uz naprezanje (SOHIC – Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking),
- stepeničasto raspucavanje (SWC – Stepwise Cracking), napetosna korozija (SCC – Stress Corrosion Cracking),
- hladne pukotine (CC - Cold Cracking), zakašnjele pukotine (DC - Delayed Cracking).

U slučaju zavarivanja cjevovoda za transport vodika fokus je na vodikovoj krhkosti, vodikom inidiranim pukotinama, hladnim i zakašnjelim pukotinama.

3.1. Vodikova krhkost

Vodikova krhkost (HE – Hydrogen Embrittlement) materijala predstavlja pojavu oštećenja koja proizlazi iz stacioniranja vodika između atoma u rešetci materijala, što rezultira deformacijom rešetke, uz djelovanje vanjskog ili preostalog naprezanja. Ovaj fenomen ograničava pokretanje dislokacija, struktura materijala se deformira, a prisustvo stranog atoma (vodika) uzrokuje lokalizirano naprezanje, što rezultira otvrdnjavanjem i krhkošću materijala. Važan faktor u ovom procesu je veličina intersticija (praznina ili prostora između atomskih pozicija) u usporedbi s veličinom vodikovog atoma kada se apsorbira u materijal. Što je manja veličina intersticije u odnosu na otopljeni vodikov atom, rešetka će biti više deformirana. Zbog razlika u koncentraciji vodika, dolazi do difuzije vodika prema deformiranim, otvrdnutim ili hladno oblikovanim područjima materijala. Naime, vodikova krhkost nastupa pri vlačnim napreznjima sporog intenziteta promjene. Ukoliko dođe do naglog porasta naprezanja, difuzija vodika se neće ubrzati kako bi pratila propagaciju pukotine [11]. Tipični materijali gdje se javlja vodikova krhkost su razni čelici, Ni i Ti legure i metastabilni nehrđajući čelici. Početak oštećenja može biti i u unutrašnjosti i na površini.

3.2. Vodikom indicirane pukotine

Vodikom indicirane pukotine (HIC - Hydrogen Induced Cracking, HACC – Hydrogen Assisted Cold Cracking) su fenomen koji karakterizira krhki lom inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i uz prisutnost vodika, pri napreznju nižem od granice tečenja. Mehanizam pukotine se općenito opisuje kao podkritična (eng. sub-critical) propagacija pukotine koja često uzrokuje zakašnjele prijelome, te ovisi o koncentraciji vodika, čvrstoći

materijala, mikrostrukture, naprezanjima i temperaturi. Prvenstveno se javljaju kod feritnih čelika i kod grubozrnate lokalno zakaljenje strukture ZUT-a [8]. Te pukotine se najčešće javljaju u ZUT-u, ali se vremenom mogu pojaviti i u metalu zavara. Bitna karakteristika vodikovih pukotina je vremenska ovisnost, što znači da se mogu pojaviti u različitim vremenskim intervalima nakon zavarivanja. Ovo zakašnjelo pojavljivanje pukotina otežava predviđanje trenutka kada će se lomiti materijal, što čini vodikovu krhkost posebno izazovnom i zahtijeva pažljivo upravljanje procesima zavarivanja kako bi se smanjio unos vodika i minimizirao rizik od pojave ovih pukotina.

3.3. Hladne pukotine

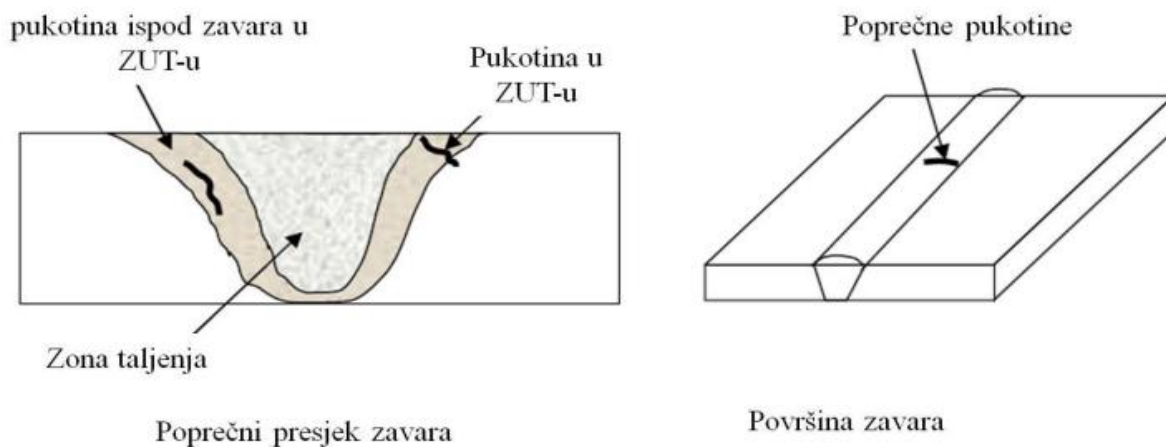
Hladne pukotine (Cold Cracking) su pukotine koje se javljaju nakon zavarivanja na temperaturama ispod 200 °C. Ove pukotine često se pojavljuju kod čelika visoke čvrstoće, osobito kod materijala većih debljina. Pozicija hladnih pukotina može biti uzdužna ili poprečna u odnosu na zavar, ili se mogu pojaviti u prijelazu prema osnovnom materijalu. Mogu biti vidljive (na površini zavarenog spoja) ili nevidljive (unutar zavarenog spoja). Hladne pukotine mogu biti mikropukotine, koje nisu vidljive ljudskom oku ili mnogim nerazornim ispitivanjima, te makropukotine, koje su vidljive ljudskom oku i lako ih je otkriti određenim metodama ispitivanja.

Pukotine nastaju tako da elementarni vodik difundira do dislokacija te stvara džepove pa se javlja dovoljan pritisak za proširenje defekta i formiranje pukotine. No, prisutnost samo vodika nije dovoljna; također je potrebna mikrostruktura pogodna za rast pukotine. Takva mikrostruktura može se formirati u čeliku koji prolazi transformaciju iz ferita u austenit dok se zagrijava tijekom zavarivanja, a zatim može formirati martenzit tijekom hlađenja. Formiranje martenzita potiče se kombinacijom udjela ugljika, legirajućih elemenata i brzine hlađenja. [12]

Glavni uzročnici nastajanja hladnih pukotina su osjetljive mikrostrukture na djelovanje vodika u metalu zavara te ZUT-u, prisutnost vodika, djelovanja naprezanja nastalih skupljanjem zavra te nepovljan položaj uključaka u zavaru. Što je udio svakog uzročnika veći, veća je mogućnost nastanka hladnih pukotina. [11]

Hladne pukotine se ne mogu potpuno spriječiti, ali u određenim mjerama mogu se smanjiti i djelomično ukloniti. Prvo je potrebno analizirati geometriju konstrukcije tako da zavar bude što manje ukrućen i da bude što manje unesenog dodatnog materijala. Važno je pravilno izabrati postupak zavarivanja i njegove parametre jer unos topline ima veliku ulovu kod pojave hladnih pukotina jer premali unos topline povećava sklonost hladnim pukotinama.

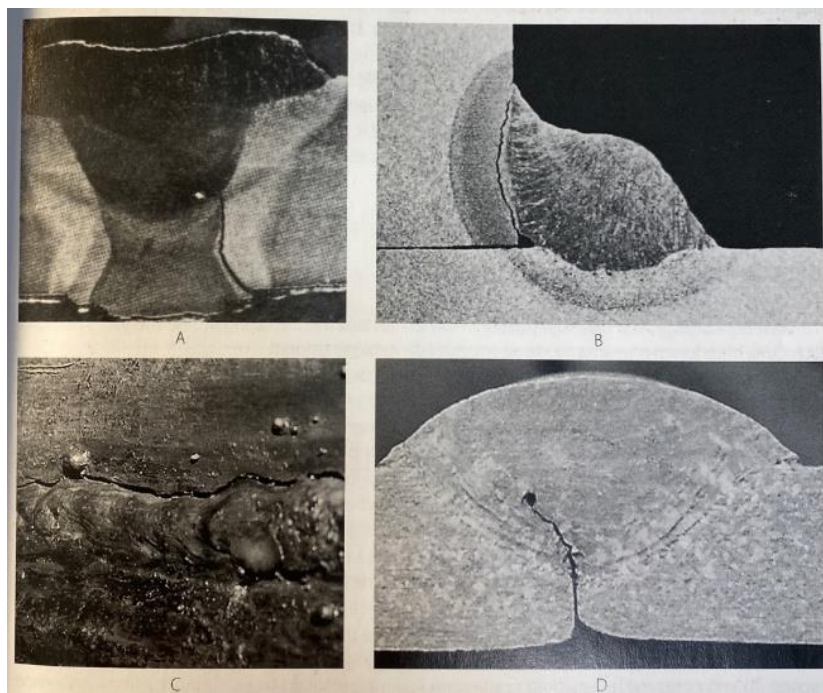
Jedan način sprječavanja pojave hladnih pukotina kod visokočvstih čelika je prethodna ili naknadna toplinska obrada materijala s ciljem snižavanja tvrdoće i osiguravanja dovoljno vremena vodik da izađe iz materijala.



Slika 5. Hladne pukotine u zavarenom spoju [12]

3.4. Zakašnjele pukotine

Zakašnjele pukotine (Delayed Crackings) su hladne pukotine koje se javljaju nekoliko sati pa čak i dan nakon zavarivanja. Baš zato je u praksi potrebno čekati 24 – 48 sati prije provedbe nerazornih ispitivanja [11].

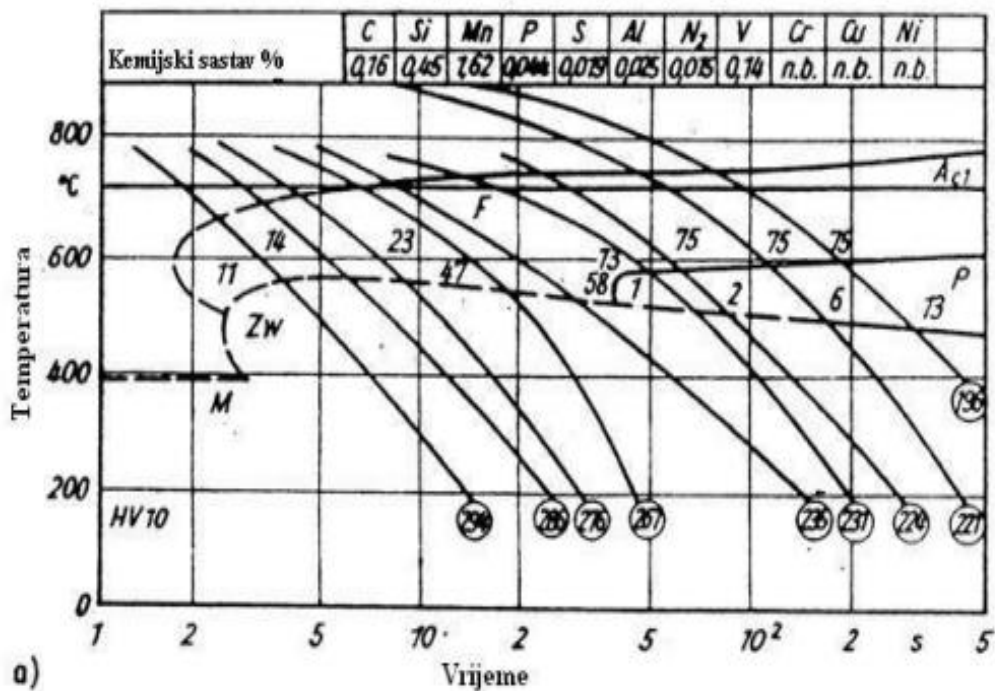


Slika 6. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja
 A – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; B - kutni spoj, pukotina u ZUT-u; C – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; D – sučeljeni spoj, pukotina iz neprovarenoga korijena zavarava [11]

4. KRITIČNE MIKROSTRUKTURE

4.1. Mikrostrukture

Postoje razne mikrostrukture koje možemo postići preradom čelika. Svaka ima svoje karakteristike, odnosno prednosti i mane. Sve to utječe na konačna svojstva čelika: tvrdoću, čvrstoću, žilavost, duktilnost, krhkost itd. Kod zavarivanja je cilj postizanje određene mikrostrukture koja treba zadovoljiti svojstva osnovnog materijala. Najčešće mikrostrukture koja se spominju kod zavarivanja su martenzitna, austenitna, feritna i perlitna. Bitno je spomenuti da se kod zagrijavanja i hlađenja dešava promjena željeza u α , γ i δ alotropska stanja. Zbog postizanja određene mikrostrukture koriste se zavarivački TTT dijagrami.



Slika 7. Prikaz zavarivačkog TTT dijagrama [10]

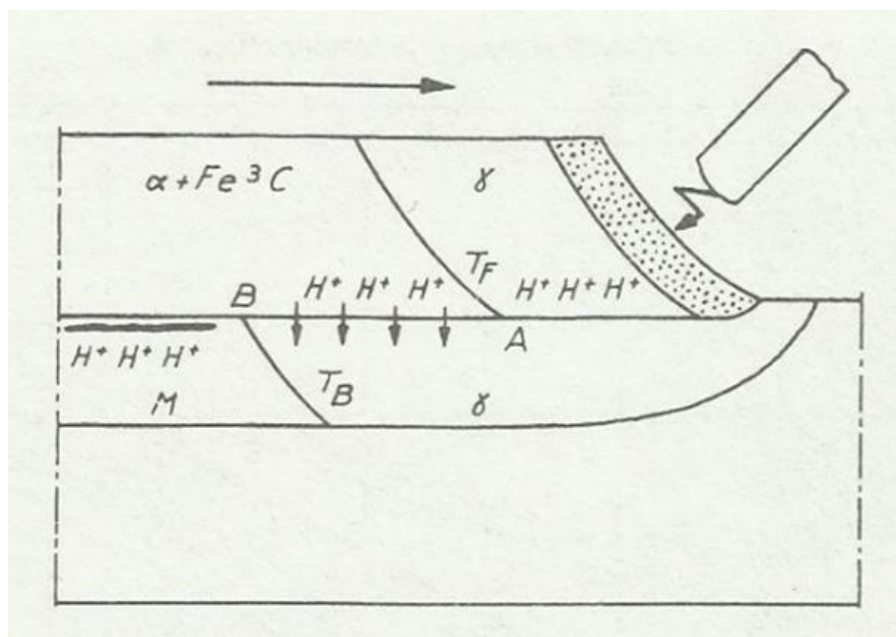
Martenzit je mikrostruktura koja nastaje brzim hlađenjem (gašenje). Glavna svojstva su velika tvrdoća i krhkost. Baš zbog te krhkosti neželjena je kod zavarivanja osobito kad postoji vodik jer je veća mogućnost da vodik difundira u pukotine te ih širi. Budući da je temperatura početka stvaranja martenzita relativno niska, vodikove pukotine se pojavljuju pri relativno niskim temperaturama, ispod 300 °C.

Austenit (γ – željezo) je mikrostruktura koja se formira na izrazito visokim temperaturama (iznad 900°C). Karakterizira ju FCC (plošno centrirana rešetka) i velika žilavost.

Ferit je mikrostruktura koja može biti u α i δ obliku, ovisi o temperaturi. Ima dobru duktilnost i čvrstoću. Čelici pri okolišnoj temperaturi su najčešće baš feritne mikrostrukture.

Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita koja sadrži 0,8 % ugljika, te nastaje pri 723°C vrlo polaganim hlađenjem.

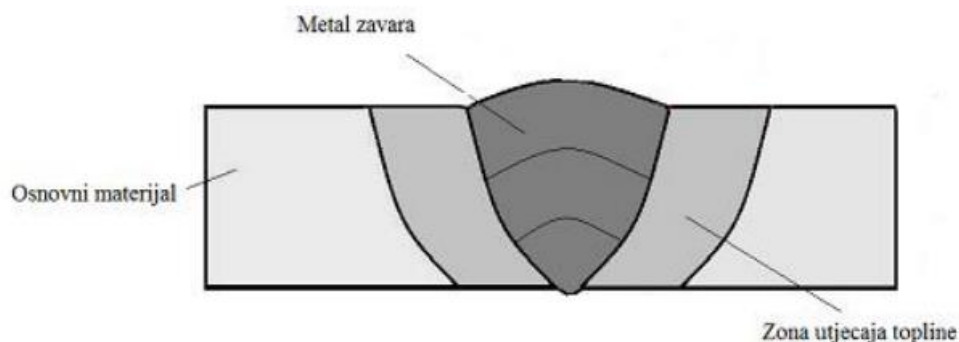
Vodik teže difundira kroz austenit koji ima FCC kristalnu rešetku gdje je manji razmak između atoma. Samim time mu je veća topivost u austenitu nego u feritu. Kod ferita je BCC kristalna rešetka gdje je veći razmak između atoma pa mu je lakše difundirati i manja mu je topivost. Zbog puno manjeg difuzijskog koeficijenta vodika u austenitu, vodik u tom području nema mogućnosti difundiranja (prema osnovnom materijalu) prije nego što se odvijuje daljnja pretvorba austenit/martenzit. Slika 8. prikazuje difuziju vodika iz zone taljenja u zonu utjecaja topline.



Slika 8. Difuzija vodika iz područja metala zavara u područje zone utjecaja topline za vrijeme zavarivanja [7]

4.2. Metalurgija zavarenog spoja

Metalurgija zavarivanja obuhvaća procese povezane s dobivanjem metala, rafinacijom, legiranjem, lijevanjem itd. Također uključuje aspekte fizikalne metalurgije poput kristalografije, mehaničkih ispitivanja i metalografije. Zavareni spoj sastoji se od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT), koja se također naziva prijelaznom zonom.



Slika 9. Shematski prikaz zavarenog spoja

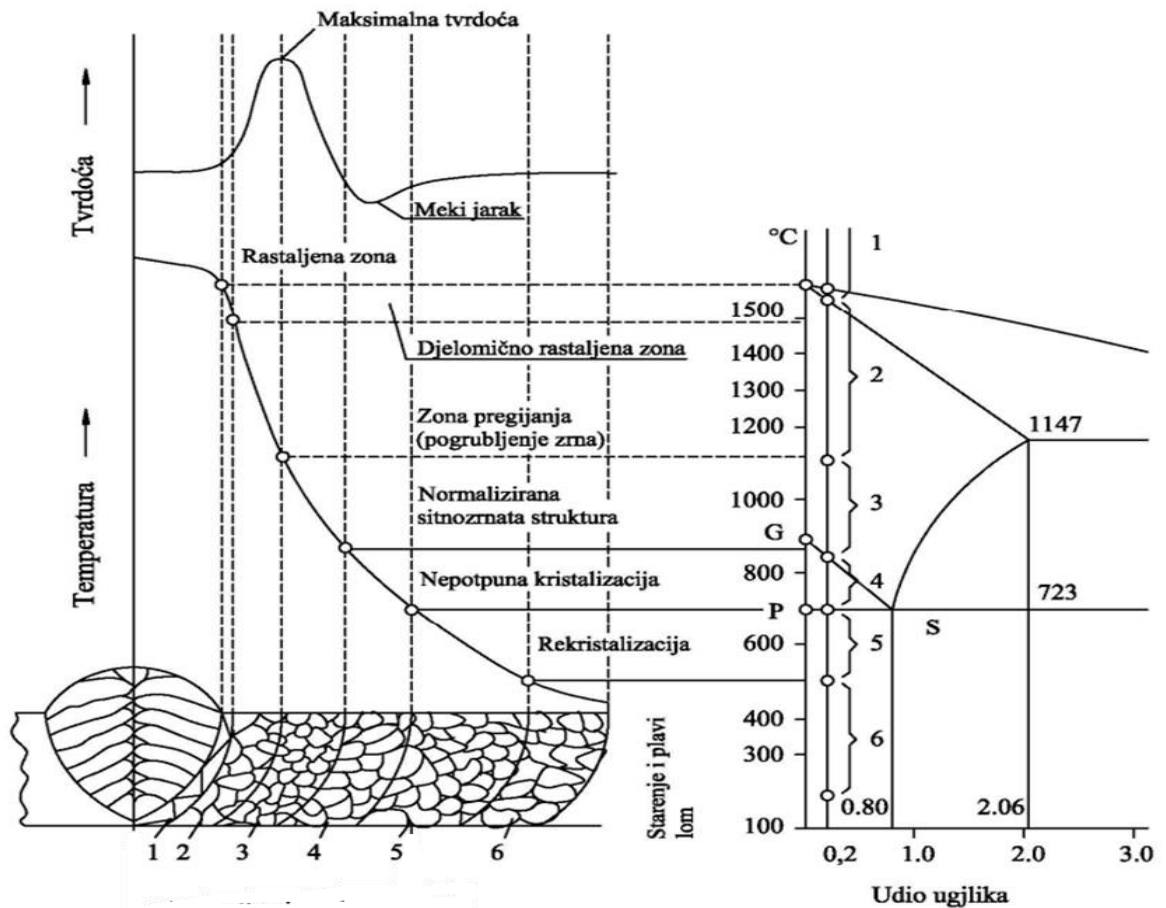
Značajna karakteristika tehnologije zavarivanja u odnosu na druge je brza promjena temperature (često preko 1000 °C/s) i lokalno unošenje topline putem određenog izvora. Lokalne temperature variraju od onih iznad tališta i vrelišta metala do temperatura okoline, ponekad čak i ispod 0 °C u slučajevima posebnih postupaka poput kaljenja. Ovi uvjeti uzrokuju lokalna istezanja i stiskanja, što rezultira deformacijama i napetostima. Također, dovode do kemijskih reakcija između rastaljenog metala i okoline (troske, atmosfere), različite rastvorljivosti među elementima i fazama te difuzijskih procesa. Sve ove interakcije rezultiraju neujednačenom mikrostrukturom presjeka zavarenog spoja, uz prisutnost trajnih deformacija i preostalih napetosti. [13]

Zavarivanje značajno utječe na promjene kemijskog sastava u zoni taljenja, kao i na strukturu zone taljenja i zone utjecaja topline. Ovaj proces često dovodi do pogoršanja mehaničkih, korozivskih i drugih karakteristika zavarenog spoja. [14]

U zoni taljenja (ZT) tijekom procesa zavarivanja, rastaljeni metal koji je iznad likvidus linije tj. koji je potpuno rastaljen metalurški reagira s troskom i okolnom atmosferom. Pod utjecajem atmosfere i sastava rastaljenog metala, nastaju oksidi, nitridi, karbidi, karbonitridi, sulfidi, eutektici, intermetalni spojevi i druge faze. Nakon toga, dolazi do kristalizacije i stvrdnjavanja tijekom hlađenja, čime se formira zona taljenja koja daje drugačiju strukturu od osnovnog materijala (OM). Strukturne promjene, izlučivanje faza i pojave grešaka poput pora

i pukotina mogu se dogoditi ovisno o vrsti metala i brzini hlađenja. Klince i rast kristala obično se pojavljuju okomito na rubove spoja, sukobljavajući se u sredini i stvarajući zonu segregacije nečistoća s nižim talištem. Ova zona može uzrokovati vruće pukotine ili predstavljati slabo mjesto pri opterećenju. U zoni taljenja gdje obično ima manji udio ugljika unosi se najviše topline i mikrostruktura iz rastaljenja austenitne prelazi u feritnu strukturu.

Zona utjecaja topline (ZUT) teoretski obuhvaća područje osnovnog materijala koji nije bio taljen tijekom zavarivanja, ali je zbog unošenja topline zavarivanjem došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozivskih ili drugih svojstava. U ovoj zoni dolazi do modifikacije veličine zrna, usmjerenja zrna i strukture. Zbog brzog hlađenja dešava se promjena iz austenita u martenzit.



Slika 10. ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika s 0,2 %C [15]

5. ČELICI ZA IZGRADNJU CJEVOVODA PREMA NORMI API 5L

Cjevovodi igraju ključnu ulogu u prijenosu tekućina i plinova. Kako bi se postigla veća količina transporta, javlja se sve veća potreba za naprednijim materijalima, uključujući nove čelike, koji mogu zadovoljiti izazove suvremenih uvjeta rada cjevovoda. Glavni cilj novijih čelika za cjevovode je da podnose veća opterećenja, imaju bolju zavarljivost i manji poprečni presjek. Samim time smanjuje se ukupna masa i volumen cjevovoda. Također smanjuju se troškovi zavarivanja pa u konačnici smanjuje se i ukupni trošak izgradnje cjevovoda. U troškove izgradnje cjevovoda spadaju troškovi materijala, montaže, zavarivanja i ostalo. Treba uzeti u obzir da je planirana izgradnja cjevovoda za transport vodika do 2035. veća od ukupne trenutne postojeće mreže. Da se smanji debljina stijenke za samo 1 mm uz mogućnost prenošenja istog opterećenja, to bi u konačnici uvelike utjecalo na masu, volumen i ukupne troškove izgradnje na duge udaljenosti.

5.1. Norma API 5L

Postoje razne norme za izgradnju čelika za cjevovode koje se mogu razlikovati u određenim stvarima. Zbog sigurnosti izgradnje, svaki čelik mora zadovoljavati zahtjeve. U tim normama pravilo je određeno označavanje, mehanička, kemijska i tehnološka svojstva.

Američka norma API 5L (American Petroleum Institute) klasificira gradacije čelika za izgradnju cjevovoda. Potpuno definira njihov kemijski sastav, mehanička svojstva te sva potrebna tehnološka svojstva. Mikrostruktura pojedine gradacije čelika ovisit će o načinu proizvodnog procesa (PSL- Product Specification Level). U normi se zasebno klasificiraju čelici za bešavne cijevi i čelici za šavne cijevi. Zadnja verzija norme je 46. izdanje iz 2023. U normu spadaju čelici oznaka B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, X100, X120.

Slovo X za sve gradacije čelika

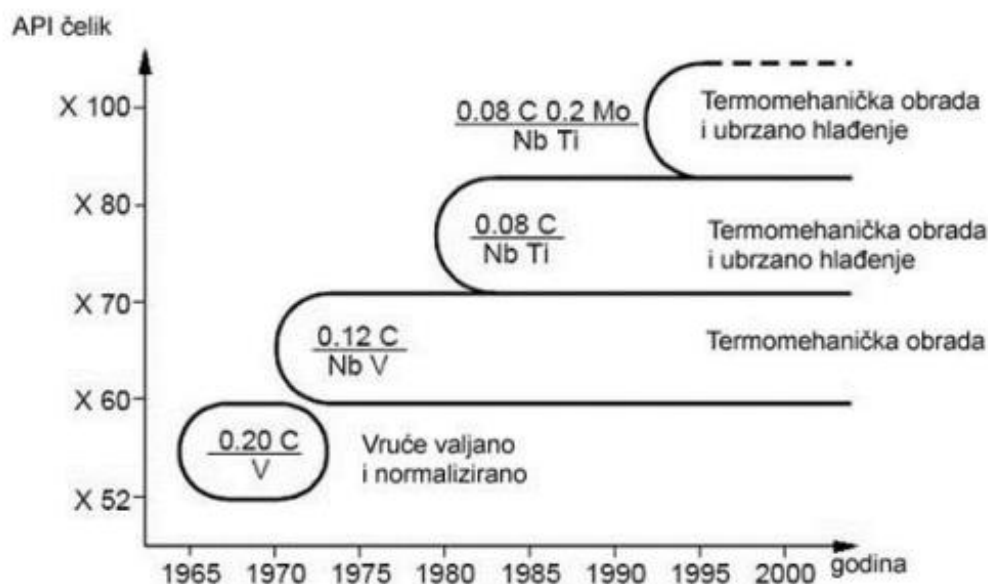
Broj označava minimalnu granicu razvlačenja u psi

Slika 11. Označavanje čelika za izgradnju cjevovoda prema normi API 5L [8]

Razlikuju se tri grupe ovih čelika [15]:

- čelici povišene čvrstoće ($R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$)
- čelici visoke čvrstoće ($500 \text{ N/mm}^2 < R_{p0,2} < 1000 \text{ N/mm}^2$)
- ultračvrsti čelici ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$)

Za većinu današnjih zahtjeva za transport nafte i plina najčešće se koriste čelici gradacije X70 i X80 prema API 5L, dok se X90 i X100 polako uvode u primjenu. Na slici 12. prikazan je kronološki razvoj čelika za transportne cijevi i način njihove proizvodnje, te se može vidjeti kako dodatak molibdena, titana i nikla te termomehanička obrada omogućavaju povećanje čvrstoće do gradacije X100, uz to je vidljiv trend pada udjela ugljika kroz sve godine [15].



Slika 12. Kronološki razvoj čelika za cjevovode [15]

5.2. Gradacija čelika X70

Čelici grupe X70 prema API 5L karakteriziraju se izvrsnim mehaničkim svojstvima i visokom zavarljivošću, što je rezultat napretka u metalurgiji i termomehaničkoj obradi. Inovacije u smanjenju udjela ugljika ispod 0,12 %, uvođenje mikrolegiranja s Nb, V ili Al, uz pravilno podešavanje parametara toplinske obrade, rezultirale su sitnozrnatom strukturom s iznimnim mehaničkim karakteristikama. Smanjenje udjela ugljika i primjena termomehaničke obrade imaju za posljedicu smanjenje veličine feritnog zrna. Ovaj postupak istovremeno povećava čvrstoću materijala i smanjuje prijelaznu temperaturu. Gubitak čvrstoće uzrokovan

smanjenjem udjela perlita nadomješten je precipitacijskim očvršćavanjem i dislokacijama. Smanjenje udjela perlita, usitnjavanje zrna, očvršćavanje mehanizmom umrežavanja dislokacija i precipitacijom rezultiralo je kombinacijom svojstava gradacije X70 prema API 5L pri čemu je zadržana dobra zavarljivost i prihvatljive prijelazne temperature iz žilavog u krhko stanje. [8]

Primjena X70 čelika u svakodnevnim situacijama obuhvaća izgradnju cjevovoda, dok se u manjoj mjeri koriste i u off-shore postrojenjima. Ipak, zbog specifičnosti njihove mikrostrukture, nužno je precizno definirati parametre zavarivanja u uskim područjima kako bi se postigli zavareni spojevi s željenim mehaničkim svojstvima. [8]

X70			
Prema standardu			
C	0.16	Si	0.45
Mn	1.65	P	0.025
S	0.015	V	0.1
Nb	0.06	Ti	0.06
Cr	0.3	Al	0.06
B	-	Ni	0.3
Mo	0.35	Cu	0.25
N	0.012		
Projekti			
C	0.09-0.1	Si	0.320-0.330
Mn	1.6-1.630	P	0.014-0.02
S	0-0.005	V	0.05-0.079
Nb	0.01-0.037	Ti	0.01-0.012
Cr	0.03-0.07	Al	0.035-0.043
B	-	Ni	0.037-0.05
Mo	0.013-0.02	Cu	0.017-0.04
N	0.009		
Standard			
$R_{p0.2}$ [N/mm ²]	485-605		
R_m [N/mm ²]	575-785		
A, %	>18		
URL [J] (0 °C)	>40-77		
Projekti			
$R_{p0.2}$ [N/mm ²]	522-544		
R_m [N/mm ²]	644-653		
A, %	26-28		
URL [J] (-40/-20/0 °C)	180-192/176-262/-		
-.....detalji nisu poznati			

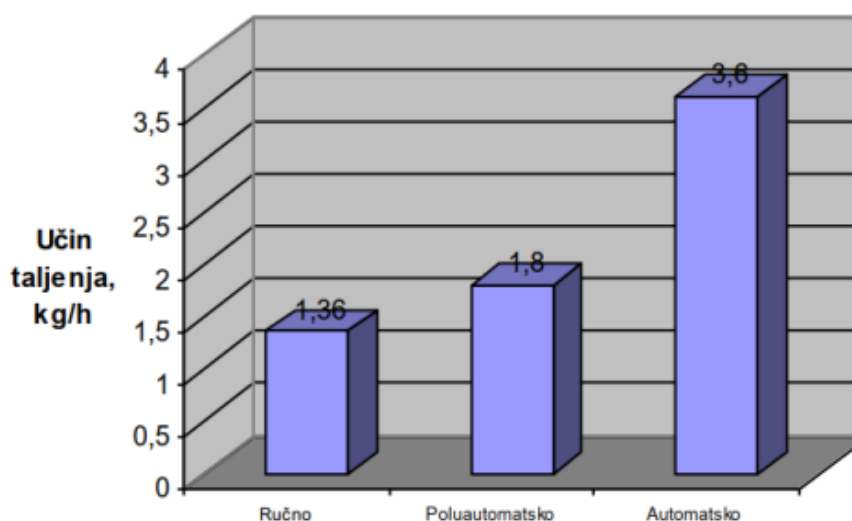
Slika 13. Prikaz kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika X70 prema standardima API i EN 10 208-2 u usporedbi s podacima iz prakse [16]

6. AUTOMATSKI POSTUPCI ZAVARIVANJA CJEVOVODA

Zavarivanje, kao ključna tehnologija u izgradnji cjevovoda, ne samo da diktira tempo napredovanja projekta, već ima dubok utjecaj na sigurnost eksploatacije. U procesu planiranja izgradnje cjevovoda, postavljaju se pitanja troškova i rokova isporuke, pri čemu kvaliteta zavarenih spojeva mora biti besprijekorna kako bi se izbjegle potencijalne havarije uzrokovane čak i najmanjim greškama.

Gledajući s ergonomske i humane strane, zavarivači su suočeni s izazovnim uvjetima koji proizlaze iz zahtjeva poput rokova izgradnje i specifičnosti terena. Rad u prisilnim položajima, izloženost teškim vremenskim uvjetima, toplina od predgrijavanja cijevi, kao i nužnost brušenja međuprolaza i čišćenja od troske čine radne uvjete teškima, često izloženima umoru zavarivača. U situacijama gdje se traže sve kvalitetniji spojevi, podizanje granice prihvatljivosti dodatno otežava održavanje potpune koncentracije. [17]

U ovakvom kontekstu, prijelaz s konvencionalnih ručnih tehnika na sustave za automatsko zavarivanje predstavlja logičan korak. Ovi sustavi ne samo da pružaju mogućnost smanjenja radnog opterećenja operatera, već i unapređuju kvalitetu zavarenih spojeva. Automatsko zavarivanje omogućuje brzu i preciznu izvedbu zavara, čime se ostvaruje ravnoteža između produktivnosti i vrhunske kvalitete u procesu izgradnje cjevovoda. Međutim, ulaganja u automatski postupak zavarivanja su daleko najveća, fleksibilnost je minimalna, a traži se i vrhunska priprema spoja. Prednosti automatskog zavarivanja dolaze do izražaja na velikim projektima, s većim promjerom cijevi i debljinom stijenke.



Slika 14. Usporedba učina taljenja pri ručnom, poluautomatskom i automatskom zavarivanju [18]

Osnovni čimbenici koji utječu na odabir tehnologije zavarivanja pri izgradnji cjevovoda su [18]:

1. duljina cjevovoda
2. rok izvedbe
3. vrsta materijala,
4. promjer i debljina stjenke cijevi
5. konfiguracija terena
6. klimatski uvjeti
7. uvježbani zavarivači

Prednosti automatskog zavarivanja su [17]:

- veća količina rastaljenoga materijala u jedinici vremena
- veća brzina zavarivanja
- veća produktivnost
- manji broj grešaka (ujedno i manji broj popravaka)
- bolja kontrola geometrije zavara
- bolja kontrola unosa topline (posebno bitno kod čelika visoke čvrstoće)
- veća iskoristivost dodatnog materijala (nema bacanja polupotrošenih elektroda ni rezanja kraja žice)
- eliminacija nastavaka jer je moguće zavarivati u jednome prolazu
- manje brušenje u odnosu na zavarivanje celuloznim elektrodama kod REL postupka
- neovisnost o tržištu zavarivača (teško naći dovoljan broj REL zavarivača)
- manja količina vodika u metalu zavara u odnosu na celulozne elektrode (pojava hladnih pukotina)
- nema posebnih uvjeta za čuvanje i pripremanje dodatnog materijala.

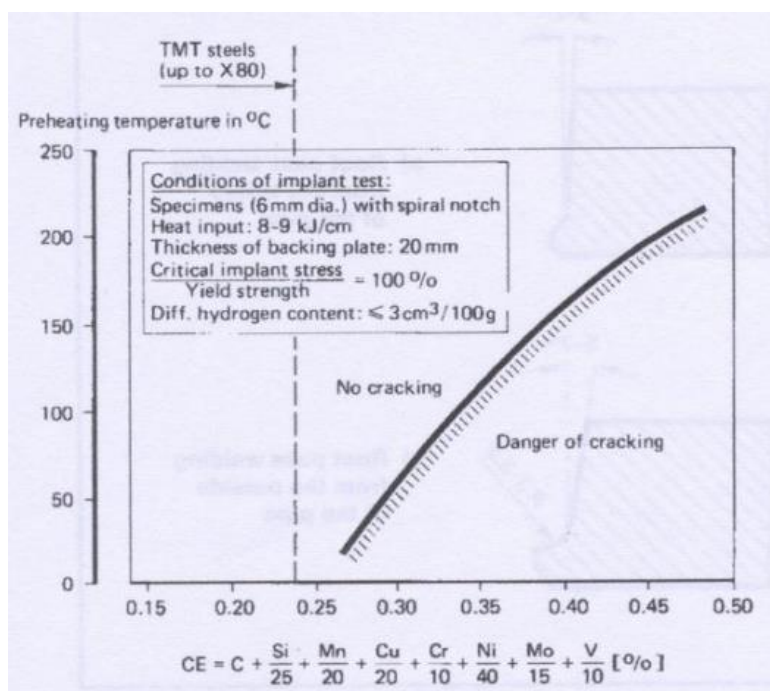
Nedostaci automatskog zavarivanja su [17]:

- skupa i složena oprema
- ovisnost primjene o složenosti trase jer za specijalne točke još uvijek su neophodni zavarivači
- mogući problemi s plinskom zaštitom kod jakog vjetra i lošeg vremena
- veći zahtjevi za održavanjem opreme
- zahtjeva se jaka logistika

6.1. Opasnost od pukotina

Ako se na temelju CE komparira opasnost od pojave hladnih pukotina primjećuje se značajna razlika u opasnosti od pojave hladnih pukotina između automatskog MAG postupka i konvencionalnog REL zavarivanja s celulozno i bazično obloženim elektrodama, posebice za čelike do klase X80.

Kod celulozno obloženih elektroda, količina difundiranog vodika može doseći više od 40 ml/100 g zavara, što je značajno veće u odnosu na bazično obložene elektrode gdje ta količina iznosi do 5 ml/100 g zavara. U MAG postupku, ta količina dodatnog vodika je čak ispod 3 ml/100 g zavara. Ova razlika direktno utječe na temperaturu predgrijavanja materijala te povećava ili smanjuje opasnost od pojave hladnih pukotina. Niska količina difundiranog vodika u MAG postupku ukazuje na manju opasnost od hladnih pukotina u odnosu na konvencionalne metode zavarivanja s obloženim elektrodama. [18]



Slika 15. Ovisnost temperature predgrijavanja o CE za MAG postupak [18]

Za REL zavarivanje s obloženim elektrodama, posebice celuloznom i bazičnom, zahtjevi za predgrijavanjem su visoki, dok je kod MAG postupka primjetno da se često postižu uvjeti bez potrebe za predgrijavanjem, čime se eliminira opasnost od hladnih pukotina. Unatoč tome, iz predostrožnosti se preporuča minimalno predgrijavanje na 50°C u MAG postupku, osobito zbog potencijalne kontaminacije vodikom iz vlage i nečistoća. Kada su u pitanju

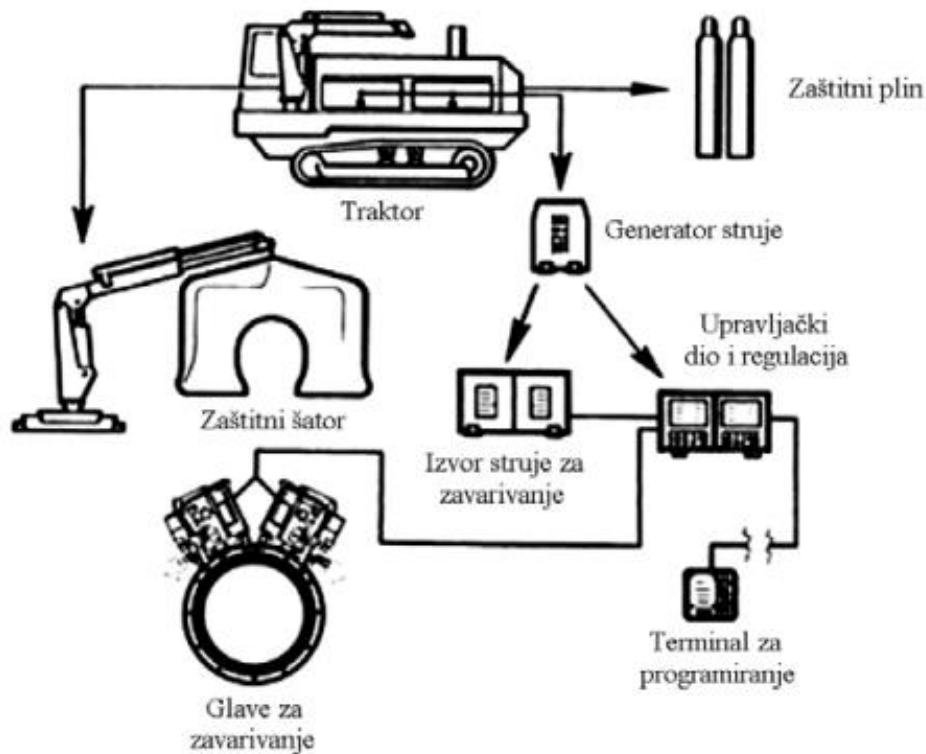
specifični zahtjevi, primjerice za cjevovode koji prenose plin s korozivski agresivnim komponentama ili kad se zahtijeva niska tvrdoća do 248 HV 10, preporučena temperatura predgrijavanja iznosi minimalno 100°C. [18]

Primjena automatskog MAG zavarivanja ne donosi samo pozitivne ekonomske i tehnološke učinke, već također značajno utječe na integritet i mehanička svojstva zavarenog spoja. Ovo je posebno značajno u slučajevima kada se koriste visokočvrsti čelici te ukazuje na važnost pažljivog pristupa i preciznog upravljanja procesima zavarivanja, uzimajući u obzir specifičnosti materijala i uvjeta primjene.

6.2. Oprema

Veliku važnost imaju oprema i izvori struje kod automatskog zavarivanja. Ovisno o proizvođaču moguće su manje izmjene u izvedbi. Preferira se i modularna izvedba ovih sustava kako bi se postigla bolja fleksibilnost ovisno o zahtjevima. Sustav za automatsko zavarivanje vrlo je robustan i sastoji se od [17]:

- traktora koji služi za transport i manipulaciju (na njemu se nalaze generatori za struju, izvori struje, spremnici zaštitnih plinova i dr.)
- agregat za struju pokretan diesel motorom
- izvor struje za zavarivanje (zahtijeva se visoka intermitencija jer se zavaruje bez prekida)
- kontrolni sustav koji objedinjuje upravljanje zavarivanjem i gibanjem glave za zavarivanje
- terminal za programiranje
- glava za zavarivanje (pištolj, dodatni materijal...)
- spremnik zaštitnih plinova s mješačem
- zavarivački šator
- sustav za pozicioniranje i centriranje cijevi.



Slika 16. Schematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje cjevovoda [17]

6.3. Razvijanje i inovacije

Razvijanje tehnološki ispravnog i ekonomski isplativog sustava za automatsko zavarivanje cjevovoda zahtijeva integraciju niza ključnih komponenata. To uključuje kvalitetan izvor struje, glave za zavarivanje koje često sadrže više pištolja, sustav za dovod žice, vodilice koje omogućuju kretanje glava duž oboda cijevi te upravljački sustav. Operater ima ključnu ulogu u pozicioniranju sustava, puštanju u pogon i kontroli rada. Jako je bitna prilagodba sastava plinske mješavine uz osnovne parametre zavarivanja jer ima značajan utjecaj na geometriju i kvalitetu zavarenog spoja. [17]

U suvremenim pristupima, primjećuje se upotreba sofisticiranih mikroprocesorski upravljanih izvora struje. Ti izvori struje koriste ugrađeni algoritam koji regulira prijenos metala u električnom luku, čime se osigurava stabilnost procesa zavarivanja. Napredni sustavi za vođenje glave za zavarivanje omogućuju i njihanje, što postaje posebno značajno pri zavarivanju popune i završnih prolaza. [17]

U inovacijama se također primjećuje mogućnost zavarivanja korijenskog prolaza bez potrebe za podloškama, smanjujući time rizik od uključaka bakra koji se mogu pojaviti kada se koristi bakrena podloška. Uz to, razvijaju se i posebni dodatni materijali, poput žica i praškom

punjenih žica, te optimizirani omjeri plinskih mješavina jer imaju značajan utjecaj na geometriju i kvalitetu zavarenog spoja. Sve ove inovacije ukazuju na težnju ka efikasnijim, preciznijim i visokokvalitetnim procesima kako bi se iskoristili potencijali automatskog zavarivanja cijevovoda u što većoj mjeri. [17]

6.4. Postupak automatskog zavarivanja

Postupak kompletnog automatskog zavarivanja sastoji se od pripreme spoja, zavarivanjem korijena i vrućeg prolaza te popune i završnih prolaza.

6.4.1. Priprema spoja

Rubovi cijevi trebaju se obraditi posebnim uređajem koji strojnom obradom oblikuje U žlijeb vrlo malog kuta otvora tako da se minimalizira potrebna količina dodatnog materijala. Cijevi se pozicioniraju pomoću pneumatskog unutarnjeg centralizera s bakrenom podloškom, što osigurava zadržavanje i oblikovanje taline pri zavarivanju. Bakrena podloška omogućuje sigurni provar uz maksimalno nadvišenje korijena do 1mm, što smanjuje dinamičke gubitke strujanja medija. [17]

6.4.2. Zavarivanje korijena i vrućeg prolaza

Korijen se zavaruje prema dolje s dvije glave istovremeno, i to bez njihanja. Priprema spoja nema razmaka tako da se primjenjuju jake struje kako bi se ostvario provar. Prva glava kreće od 12 sati, dok druga glava kreće tek kada se stvori dovoljan odmak prve glave (položaj oko 2 sata). Koristi se puna žica s adekvatnom plinskom mješavinom kojoj za prvi prolaz treba povećati udio ugljičnog dioksida kako bi se dobilo više energije i sigurniji provar. Vrući prolaz se zavaruje na isti način kao i korijen. [17]

6.4.3. Zavarivanje popune i završnih prolaza

Popuna i završni prolazi zavaruju se na isti način kao i korijen. Ovisno o debljini stijenke, moguće je instalirati i do pet zavarivačkih stanica s dvije glave za zavarivanje. Kod zavarivanja popune i završnih prolaza provodi se njihanje uz određenu frekvenciju i pomak. Učinkovitost kod zavarivanja popune i završnih prolaza punom žicom raste do 5,1 kg/h te raste i broj zavara po danu. Kvaliteta spojeva je dobra uz učestalost popravaka između 3 i 5 %. [17]

6.5. Postupak 135

Postupak 135 označava MAG zavarivanje punom žicom. To je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina gdje se između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode (žice) uspostavlja električni luk.

Najčešće korišteni dodatni materijal kod MAG postupka zavarivanja su pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Zbog boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije površine žica su pobakrene ili poniklane. Žice su namotane na kolut te njihova površina mora biti potpuno glatka i dimenzijski vrlo točna. [19]

Primjena MAG postupka tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i eliminira potrebu zavarivanja tzv. „vrućeg“ sloja kod izgradnje cjevovoda. [20]

Razvoj MAG postupka potaknut je višestrukim faktorima, prije svega zbog njegove iznimne brzine zavarivanja, visoke količine rastaljenog materijala u jedinici vremena te jednostavnog rukovanja ili mogućnosti automatizacije. Danas, MAG zavarivanje ostaje jedan od najčešće primijenjenih postupaka u zavarivačkoj industriji. Ključan faktor u razvoju ovog postupka leži u napretku izvora struje za zavarivanje. Prijenos metala, odnosno način prijenosa rastaljene kapljice u talinu radnog komada, podložan je stalnim poboljšanjima. To uključuje prijenos metala kratkim spojevima, prijenos štrcajućim lukom, prijenos mješovitim lukom i prijenos impulsnim lukom. Osim toga, razvoj izvora struje omogućava modificiranje konvencionalnog MAG postupka s ciljem poboljšanja kvalitete zavarenih spojeva, povećanja produktivnosti i optimizacije troškova.

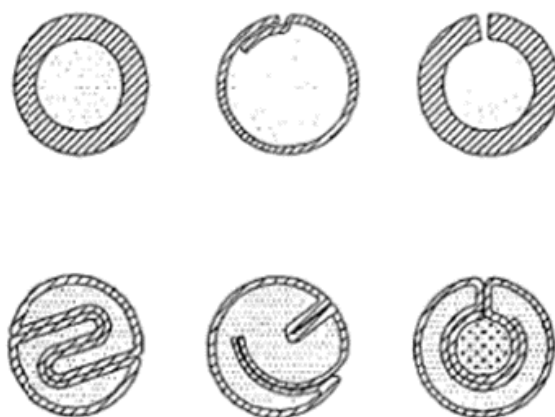
Zbog tih zahtjeva, pojavljuje se niz alternativa MAG zavarivanju, koje se često deklariraju kao posebni postupci, iako su u suštini varijacije MAG postupka (135). Na tržištu danas postoji više od dvadeset varijanti MAG zavarivanja koje koriste modificirane načine prijenosa metala, posebno u području niskog unosa topline, kombinirajući kratki spoj i strujni puls. Najčešći modificirani postupci su STT (Surface Tension Transfer), FastROOT i RMT (Rapid MIG/MAG Technology). [20]

6.6. Postupak 136

Postupak 136 označava MAG zavarivanje praškom punjenom žicom (FCAW- Flux Cored Arc Welding). Predstavlja visokoučinski elektrolučni postupak zavarivanja, gdje se održava električni luk između neprekidno dopremljene žice i radnog komada. Unutar žice nalazi

se prašak koji se tali tijekom zavarivanja, stvarajući zaštitni sloj koji štiti talinu zavara. Postupak ima dvije varijante, ovisno o primjeni zaštitnog plina. Prva varijanta koristi zaštitni plin, dok se druga varijanta primjenjuje u situacijama gdje zaštitni plin nije potreban, posebno na terenu pod utjecajem vjetra. Ove razlike pružaju prilagodljivost postupka ovisno o konkretnim uvjetima primjene, čime se postiže efikasnost i visoka kvaliteta zavarenih spojeva, čak i u zahtjevnim situacijama. [20]

Praškom punjena žica je šuplja cijev ispunjena mješavinom deoksidatora, metalnog praha i fero-legura. Razlika između praškom punjene žice i pune žice jedva je vidljiva, a šav gdje je cijev zatvorena gotovo je neprimjetan.



Slika 17. Presjeci praškom punjenih žica [19]

Prednosti FCAW postupka obuhvaćaju veliki depozit dodatnog materijala, veću penetraciju od konvencionalnog MAG postupka, visoku kvalitetu zavara, manje prskanja, potrebno manje čišćenja zavara, mogućnost zavarivanja u svim položajima te veće brzine zavarivanja. Međutim, nedostaci uključuju potrebu za uklanjanjem troske nakon zavarivanja, povećano stvaranje dima u odnosu na REL i MAG postupke, višu cijenu žice te izazove prilikom zavarivanja na terenu, posebno pri utjecaju vjetra.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ocijenjena je prikladnost tehnologije za izradu cijevovoda za transport vodika na temelju mehaničkih karakteristika zavarenog spoja načinjenog postupcima 135 i 136 automatskim zavarivanjem. Mehaničke karakteristike dobivene su na cijevnim epruvetama materijala S355J2H. Prvobitna cijev bila je promjera $\varnothing 406,4$ mm (16") i debljine stijenke 25 mm. Oblik žlijeba je napravljen U pripremom. Korijen je zavaren MAG LSC postupkom, dok je popuna (i završni slojevi) zavarena FCAW postupkom.

7.1. Dobiveni rezultati

U svrhu ocjene kvalitete zavarenoga spoja epruvete provedena su sljedeća ispitivanja:

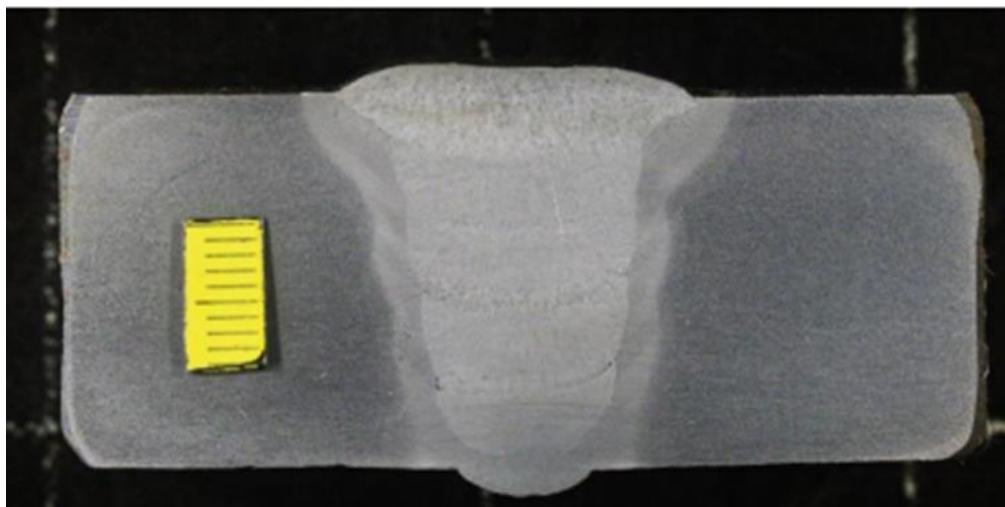
- radiografsko ispitivanje
- analiza makroizbrusaka
- mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10
- statičko vlačno ispitivanje
- ispitivanje žilavosti metala zavara
- ispitivanje na savijanje.

7.1.1. Radiografsko ispitivanje

Tijekom radiografskog ispitivanja zavarenih spojeva epruvete, snimljeni su radiogrami koji su pokazali indikacije na određenim dijelovima ispitanog zavara. Konkretno, indikacije su primijećene u području vrućeg prolaza, posebice u dijelu gdje je korištena praškom punjena žica promjera 1,0 mm. Analizom zaključujemo da su uzroci indikacija nedovoljno čišćenje međuprolaza i prisutnost prevelikog slobodnog kraja žice zbog uskog žlijeba. Zbog te situacije, sapnica pištolja nije mogla prodrijeti dovoljno duboko u žlijeb, stvarajući mogućnost za proširenje indikacija i eventualno stvaranje pukotina. Kako bi se spriječile ove nesavršenosti, potrebno je poboljšati proces čišćenja međuprolaza te prilagoditi parametre zavarivanja. Također, razmatra se mogućnost prilagodbe alata ili postavki kako bi se osigurala visoka kvaliteta zavarenog spoja bez indikacija.

7.1.2. Analiza makroizbruska

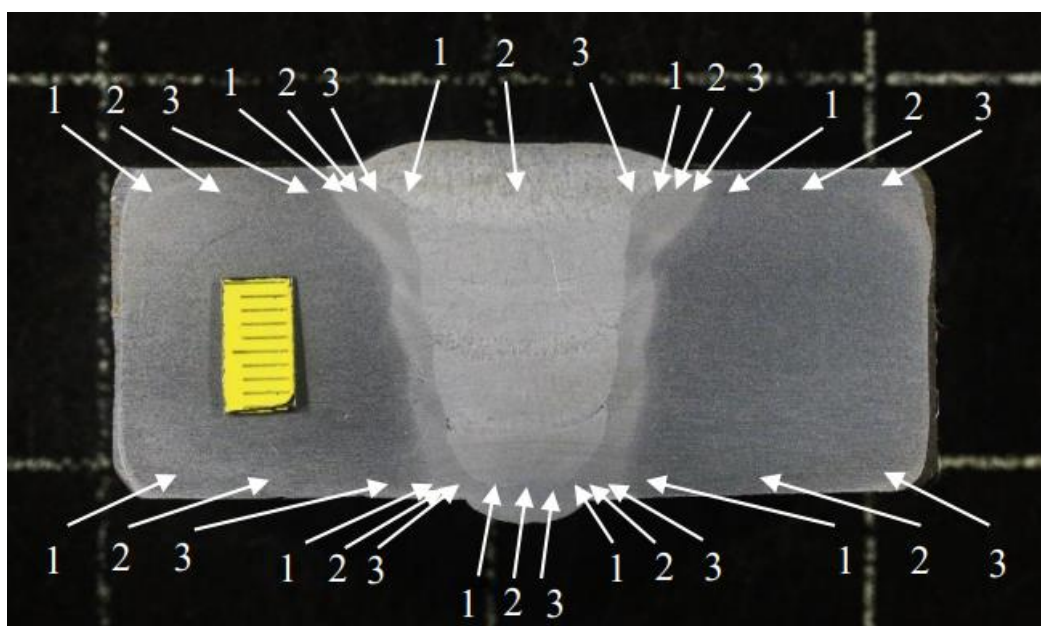
Vizualnom kontrolom zavara mogu se vidjeti male indikacije koje su opisane u prethodnoj točki. Vidljivo je da u zavaru nema pojave pukotina te da je dobro provaren.



Slika 18. Makroizbrusak epruvete [21]

7.1.3. Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10

Mjerenje tvrdoće je provedeno Vickersovom metodom HV10. Tvrdoća se mjerila u dvije linije, jedna sa strane lica zavarenoga spoja i jedna sa strane korijena zavarenoga spoja u oba slučaja u osnovnome materijalu (OM), zoni utjecaja topline (ZUT) i metalu zavara (MZ).



Slika 19. Lokacije mjerenja tvrdoće na uzorku [21]

Tablica 1. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Linija	OM			ZUT			MZ			ZUT			OM		
Lice	221	182	186	202	206	228	199	213	245	216	206	187	180	181	164
Korijen	183	192	193	218	206	199	203	230	228	199	205	206	193	192	181

7.1.4. Statičko vlačno ispitivanje

Ispitivanje je provedeno prema HRN EN ISO 6892-1 na plosnatim uzorcima za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 20. Uzorak epruvete nakon statičnog vlačnog ispitivanja [21]

Tablica 2. Rezultati statičnog vlačnog ispitivanja

Veličina	a_0 , mm	b_0 , mm	S_0 , mm ²	F_m , kN	R_m , MPa
Rezultat	24,21	24,81	600,65	308,5	513,6

7.1.5. Ispitivanje žilavosti metala zavara

Ispitivanje je provedeno prema HRN EN ISO 148-1. Uzorci su hlađeni 30 minuta u smjesi suhog leda i alkohola kako bi se postigla tražena temperatura. Nakon hlađenja uzorci su bili podvrgnuti ispitivanju.



Slika 21. Uzorci nakon ispitivanja žilavosti metala zavara [21]

Tablica 3. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma metala zavara

Veličina	B, mm	W, mm	L, mm	Utor, mm	Temperatura, °C	KV, J
Uzorak 1	10,00	10,00	55,00	2,00	-20	145
Uzorak 2	10,00	9,97	55,00	2,00	-20	148
Uzorak 3	9,95	9,98	54,70	2,00	-20	130
Aritmetička sredina:						141

7.1.6. Ispitivanje na savijanje

Ispitivanje je provedeno prema HRN EN ISO 5173 na dva uzorka izrezana za bočno savijanje.



Slika 22. Uzorci nakon ispitivanja bočnog savijanja [21]

Na uzorku epruvete primijetila se pukotina u području između korijenskog i vrućeg prolaza. Pojava pukotine pripisuje se prisutnosti nečistoća koje nisu uklonjene čišćenjem između prolaza. Veličina indikacije je otprilike između 0,5 mm i 1 mm. Ako nije drugačije navedeno, prema ISO 5173, nesavršenosti manje od 3 mm smatraju se prihvatljivima.

7.2. Potrebna svojstva

Zbog specifičnosti vodika, cjevovodi za transport vodika imaju posebne norme kod izgradnje. U pravilu su zahtjevi „stroži“ nego kod izgradnje cjevovoda za transport nafte ili prirodnog plina. Koriste se norme od ASME-a (American Society of Mechanical Engineers), dio B31.12 za cjevovode za transport vodika. Tamo je opisano sve na što treba obratiti pažnju kod projektiranja. Od odabira materijala, zavarivanja, testiranja, toplinske obrade, kontrole i održavanja do svega ostalog.

7.2.1. Testiranje zavara

Iz aspekta zavarivanja potrebno je provoditi sljedeće metode [6]:

- ispitivanje tvrdoće prema ASTM A370
- ispitivanje tvrdoće kvalifikaciju prema ASME BPV
- ispitivanje udarnog rada loma prema ASTM A370
- ispitivanje udarnog rada loma za kvalifikaciju prema ASME
- mehaničko ispitivanje za kvalifikaciju prema ASME BPV
- metalurško ispitivanje za kvalifikaciju prema ASME BPV
- ispitivanje propuštanja za prema ASTM E432

ASTM (American Society for Testing and Materials) A370 je standardna norma koja se odnosi na metode ispitivanja i definicije za mehanička ispitivanja čeličnih proizvoda. Ovaj standard obuhvaća različite mehaničke karakteristike, uključujući čvrstoću, elastičnost, otpornost na udar, savijanje i druge parametre.

Oznaka BPV (Boiler and Pressure Vessel) označava skup tehničkih pravila i propisa koji se koriste za dizajn, proizvodnju, ispitivanje i ocjenu kotlova, posuda pod tlakom i drugih srodnih uređaja.

ASTM E432 je norma opisuje postupke ispitivanja za određivanje propusnosti metala. Ovaj standard specificira metode ispitivanja za određivanje veličine i distribucije otvora u metalima pomoću tekućih ispitnih sredstava.

7.3. Usporedba rezultata

7.3.1. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće prema normi ASME B31.12 propisuje maksimalne vrijednosti tvrdoće za ugljični čelik od 200 HV [6]. Ova niska tvrdoća ima važnost u strojarstvu jer povećanje tvrdoće može rezultirati povećanom krhkošću materijala, što značajno utječe na prodiranje vodika i može uzrokovati ozbiljne probleme. S obzirom na proporcionalnost između tvrdoće i čvrstoće materijala, porast čvrstoće može dovesti do povećanja problema s vodikom. Stoga se u nekim situacijama zahtijeva definiranje donje i gornje granice dopuštene čvrstoće.

Dobiveni rezultati pokazuju da su na nekim mjestima tvrdoće premašile maksimalno dopuštene vrijednosti, posebice u dijelovima ZUT-a i MZ-a. Ovi rezultati sugeriraju da željena

mikrostruktura nije postignuta, što povećava rizik od pojave hladnih pukotina. Korištenjem drugačijeg dodatnog materijala te primjenom postupaka predgrijavanja i naknadnog grijanja, moguće je utjecati na smanjenje tvrdoće i, prema tome, poboljšati karakteristike materijala.

7.3.2. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje žilavosti provodi se primjenom Charpy-evog udarnog testa prema normi ASTM B31.12. Ovaj test uključuje udarni rad loma i zahtijeva minimalnu vrijednost pucanja epruvete od 20 J [6].

Dobiveni rezultati pokazuju da je aritmetička sredina pucanja u metalu zavarenog spoja iznosila 141 J. Metal zavara ima garantiranu žilavost na -40 °C (po važećim atestima) pa se zaključuje kako materijal nije imao gubitak žilavosti na -20 °C. Ova visoka vrijednost ukazuje na izuzetnu žilavost materijala, posebice pri niskim temperaturama.

7.3.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Prema normi ASTM B31.12, minimalna granica razvlačenja propisana je kao 52 ksi (kilopound per square inch), dok se za vlačnu čvrstoću postavlja zahtjev od 66 ksi [6], što ujedno iznosi približno 360 MPa za granicu razvlačenja i 460 MPa za vlačnu čvrstoću.

Dobiveni rezultati ispitivanja ukazuju na vlačnu čvrstoću razvlačenja od 513,6 MPa, što odgovara 74,5 ksi. Vidljivo je da se pucanje javlja u osnovnom materijalu, a ne zavaru. Na temelju ovih rezultata zaključujemo da materijal zadovoljava propisane zahtjeve i posjeduje potrebna mehanička svojstva.

7.3.4. Ispitivanje kemijskih svojstava

Prema normi EN 10210-1:2006 zahtjevaju se sljedeća kemijska svojstva materijala S355J2H:

Tablica 4. Zahtjevani kemijski sastav materijala S355J2H

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S
Maksimalni maseni udio [%]	0,22	0,55	1,6	0,03	0,03

Atest materijala daje sljedeće podatke:

Tablica 5. Kemijski sastav materijala S355J2H prema certifikatu [22]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	V	Nb	N	As	Mo	Sn	C _{ev}
0,15	1,31	0,27	0,004	0,008	0,05	0,09	0,2	0,001	0,031	0,004	0,002	0,006	0,006	0,008	0,012	0,46

Iz atesta materijala zaključuje se da materijal ispunjava propisana kemijska svojstva.

7.3.5. Ostali zahtjevi u normi ASME B31.12.

Za automatsko zavarivanje predloženi su postupci s dodatnim materijalom (GTAW, GMAW, FCAW, PAW i SAW) i bez dodatnog materijala (GTAW i PAW) [21]. Zavareni spoj je izveden korištenjem GMAW (MAG) i FCAW postupaka, što zadovoljava norme.

Što se tiče oblika stanja za transport vodika, ugljični čelici su prihvatljivi za plinovito stanje, ali ne za tekuće stanje.

Za ugljične čelike, preporučuje se predgrijavanje na minimalnu temperaturu od 80 °C kako bi se spriječilo nepotrebno stvrdnjavanje materijala tijekom zavarivanja. Također, kod materijala s debljinom stijenke većom od 20 mm, preporučuje se naknadno grijanje kako bi se kontrolirao proces hlađenja metala i smanjile potencijalne nesavršenosti ili napetosti u zavaru. Trajanje naknadnog zagrijavanja trebalo bi iznositi 2,4 min/mm debljine stijenke [6]. Važno je napomenuti da kod zavarivanja eksperimentalnog uzorka nije provedeno ni predgrijavanje ni naknadno grijanje, što može objasniti zašto su vrijednosti tvrdoće premašile maksimalno dopuštene vrijednosti. Preporučuje se primjena odgovarajućih postupaka grijanja kako bi se poboljšala kvaliteta zavarenog spoja i izbjegle nesavršenosti.

8. ANALIZA REZULTATA

Postupci	Dobiveni rezultati	Zahtjevi u normama	Zadovoljavajuće
Radiografsko ispitivanje	Uočene indikacije		NE
Analiza makroizbruska	Uočene indikacije		NE
Ispitivanje tvrdoće	..., 230, 228, 245,...HV	max. 200 HV	NE
Ispitivanje mehaničkih svojstava	513,6 MPa	min. 460 MPa	DA
Ispitivanje žilavosti metala zavora	141 J	20 J	DA
Ispitivanje na savijanje	Indikacije 0,5-1 mm	max. 3 mm	DA
Ispitivanje kemijskog sastava	Atest materijala		DA
Automatsko zavarivanje	GMAW, FCAW	GTAW, GMAW, FCAW, PAW, SAW	DA
Predgrijavanje	Nije provedeno	min. 80°C	NE
Naknadno grijanje	Nije provedeno	60 min za 25 mm	NE

Na temelju analize rezultata, dolazimo do zaključka da trenutni postupak zavarivanja primijenjen na cjevovod za transport vodika ne zadovoljava potrebna svojstva. Ovaj nedostatak značajno narušava sigurnost same konstrukcije. Iako bi cjevovod možda zadovoljio na neki kraći radni vijek, upuštati ga u operativni pogon predstavljalo bi iznimno visoki rizik od potencijalno ozbiljnih havarija. Stoga, preporučuje se pristup temeljitim poboljšanjima u postupcima zavarivanja i općenito u procesu kako bi se osigurala dugotrajna i sigurna funkcionalnost cjevovoda za transport vodika. Ovo uključuje primjenu odgovarajućih postupaka toplinske obrade, prilagodbu parametara zavarivanja te eventualnu izmjenu samog materijala te dodatnih materijala kako bi se postigli željeni standardi kvalitete.

9. ZAKLJUČAK

Vodik, zbog svojeg izuzetnog potencijala u kontekstu energetske učinkovitosti, predstavlja se kao jedno od ključnih goriva budućnosti. Najčešći način transporta vodika je putem čeličnih cjevovoda, a prognozira se povećanje izgradnje tih cjevovoda za gotovo 700 % u sljedećih 25 godina. Međutim, izgradnja ovih cjevovoda suočava se sa značajnim izazovima, posebice u području zavarenih spojeva koji su izloženi djelovanju vodika kao agresivnog medija. Eventualne greške u izgradnji mogu rezultirati značajnim financijskim gubicima i predstavljati ozbiljnu prijetnju ljudskom zdravlju. S ciljem smanjenja potencijalnih pogrešaka, tehnologije se neprestano unapređuju kako bi transport vodika bio siguran, jednostavan i učinkovit.

Konstantno se razvijaju nove vrste čelika s namjerom prenošenja većih tlakova i opterećenja, dok se istovremeno smanjuju debljina stijenke, masa i volumen materijala. Također se razvijaju moderniji automatski postupci zavarivanja cjevovoda kako bi se povećala produktivnost, učinkovitost i sigurnost uz visokokvalitetne zavare gotovo bez nedostataka.

S obzirom na visoke financijske investicije u izgradnji, nužno je pažljivo projektiranje svakog segmenta kako bi se minimizirali troškovi jer se čak i malim promjenama poput pripreme žlijeba za zavarivanje na velikom broju komada uvelike utječe na krajnje troškove izgradnje. Ponekad se isplati razmotriti prenamjenu cjevovoda namijenjenih transportu nafte i plina. Naime, njihova je dužina trenutno znatno veća od onih nego za vodik, a prenamjenom istih ne bi se trošila tolika financijska sredstva, niti bi bilo toliko emisija stakleničkih plinova nastalih proizvodnjom i korištenjem fosilnih goriva.

Baš zbog toga, eksperimentalni dio istraživanja posebno se fokusira na prilagodbu tehnologije zavarivanja za cjevovode. Procjenjuje se da li su oni „hydrogen ready“ tj. mogu li biti sigurno pušteni u rad te zadovoljiti zahtjeve koji se javljaju zbog vodika.

Zaključuje se da u ovom slučaju na temelju odabira materijala, postupka pripreme i zavarivanja, vodik, zbog svojih specifičnosti, nosi preveliki rizik za sigurno puštanje u operativni pogon. Izgradnja ili prenamjena cjevovoda zahtijeva poštivanje normi, jer su posljedice ozbiljnih havarija preopasne za ljudsko zdravlje. Ovim se ispitivanjem potvrđuje da je nužno pristupiti izazovima s oprezom kako bi se osigurala sigurnost, ekonomska održivost te sukladnost s najvišim standardima u industriji.

LITERATURA

- [1] Technetics Group,
<https://technetics.com/hydrogen-production-the-challenges-and-practical-applications/>
(preuzeto 15.12.2023.)
- [2] Narodne novine: Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine,
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_03_40_492.html
(preuzeto 16.12.2023.)
- [3] Rystad Energy,
<https://www.rystadenergy.com/news/building-the-future-hydrogen-pipelines-start-to-materialize-in-europe>
(preuzeto 15.12.2023.)
- [4] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak 2008.
- [5] Cottis R.A.: Hydrogen Embrittlement, Elsevier, 2010.
- [6] ASME B31.12-2014: Hydrogen Piping and Pipelines
- [7] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80 [doktorski rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [8] Garašić I.: Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju [doktorski rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [9] P.S. Maslennikov, V.L. Russo: Special features of the effect of hydrogen on the weldability of structural steels in underwater welding by the «wet» method, Welding International, Vol. 17(3), pp 221-225, 2003.
- [10] Lee, H.W.: Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments, Materials and Science Engineering A 445-446, 2007.
- [11] Begić Hadžipašić, A.: Utjecaj vodika na krhkost modernih konstrukcijskih čelika dobivenih na CSP – postrojenju, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu 2009.
- [12] Juraga I., Ljubić K., Živčić M., Garašić I.: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2015.
- [13] Kelkar, G.: Weld cracks, WJM Technologies, excellence in material joining, pp. 1-5
- [14] Kudumović, D.; Zavarivanje i termička obrada; 1997.
- [15] Kolednjak D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukutru i svojstva čelika API 5L X80 [doktorski rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.
- [16] Felber, S.: Pipeline Engineering, ISBN 978-3-9501528-2-1, Austrija, 2009

-
- [17] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I.: Moderni sustavi za automatsko zavarivanje magistralnih cjevovoda, Slavonski Brod 2007.
- [18] Garašić I., Kožuh Z.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, s interneta
https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/19_11_2013_19842_STROJEVI_I_OPREMA_ZA_ZAVARIVANJE_ZK.pdf (preuzeto 20.01.2024.)
- [19] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih postupaka, Zagreb 1992.
- [20] Horvat M., Kondić V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Varaždin 2012.
- [21] Frigan F.: Optimizacija tehnologije zavarivanja cjevovoda automatiziranim postupcima [diplomski rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [22] Atest osnovnoga materija S355J2H