

# Zahtjevi za zavarivanje pri proizvodnji opreme pod tlakom

---

**Hlebić, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2025**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:357645>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Stjepan Hlebić**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

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

Student: Stjepan Hlebić

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se prof. dr .sc. Ivici Garašiću na mentorstvu, odvojenom vremenu, potpori i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na strpljenju, uzajamnoj podršci i razumijevanju za sve probleme tijekom čitavog studija, kao i pisanja završnog rada.

Također zahvaljujem tvrtkama Macel plin d.o.o. i Feromihin d.o.o. koji su mi pomogli pri izradi ovog rada te pruženoj tehničkoj dokumentaciji. Posebno zahvaljujem voditelju sektora upravljanja kvalitetom dipl. ing. Luki Hlebić, te svim ostalim kolegama na susretljivosti, suradnji i korisnim savjetima.

Stjepan Hlebić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске 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 / 25 - 06 / 1       |        |
| Ur.broj: 15 - 25 -                  |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stjepan Hlebić** JMBAG: **0035230788**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zahtjevi za zavarivanje pri proizvodnji opreme pod tlakom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Requirements for welding in the production of pressure equipment**

### Opis zadatka:

Proizvodnja opreme pod tlakom podliježe formalnim i specifičnim zahtjevima posebno za tehnologiju zavarivanja. U teorijskom dijelu rada potrebno je navesti regulativu i norme koje se primjenjuju u projektiranju, proizvodnji, kontroli i održavanju opreme pod tlakom. Detaljno specificirati zahtjeve za tehnologiju zavarivanja i odgovarajuće odgovorno osoblje ovisno o kategoriji i vrsti proizvoda.

U eksperimentalnom dijelu rada opisati i dokumentirati proizvodni proces pri izradi odgovarajuće komponente opreme pod tlakom. Prema zahtjevima proizvoda, analizirati tehnologiju i odrediti sukladnost postojećih kvalifikacija postupaka zavarivanja te osoblja uključenog u proizvodnju. Prikazati karakteristične dokumente koji dokazuju slijed proizvodnje i kvalitetu zavarenih spojeva. Zaključno, na temelju prikupljenih i analiziranih podataka definirati kritična mjesta u proizvodnom procesu te dati prijedloge unaprjeđenja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.

2. rok: 10. i 11. 7. 2025.

3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. - 28. 2. 2025.

2. rok: 15. 7. - 18. 7. 2025.

3. rok: 22. 9. - 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

**SADRŽAJ**

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. PRAVILNICI O OPREMI POD TLAKOM .....  | 3  |
| 2.1. Procjena razine opasnosti tlačne opreme [1] .....                                       | 5  |
| 2.2. Postupci ocjene sukladnosti i CE oznaka .....   | 8  |
| 2.3. Norme pri izradi tlačne opreme .....  | 11 |
| 3. KONSTRUIRANJE TLAČNE OPREME PREMA PRAVILNICIMA .....                                      | 14 |
| 3.1. Metoda proračuna [1] .....  | 15 |
| 3.2. Eksperimentalna metoda [1] .....  | 17 |
| 3.3. Mjere za siguran rad i rukovanje [1] .....  | 18 |
| 3.4. Konstruiranje cjevovoda prema Pravilniku o tlačnoj opremi [1] .....                     | 19 |
| 3.5. Konstruiranje tlačnih posuda prema Pravilniku o jednostavnim tlačnim posudama [5] ..... | 20 |
| 4. ODABIR MATERIJALA ZA IZRADU TLAČNE OPREME .....   | 23 |
| 4.1. Zahtjevi za materijale pri izradi tlačne opreme [1] .....                               | 23 |
| 4.2. Obaveze proizvođača tlačne opreme [1] .....   | 24 |
| 4.3. Osiguravanje sukladnosti materijala [1] .....   | 24 |
| 4.4. Materijal za tlačne posude prema Pravilniku o jednostavnim tlačnim posudama [5] .....   | 24 |
| 4.5. Zavarljivost materijala .....   | 26 |
| 4.6. Noviji materijali pri izradi tlačnih posuda i cjevovoda .....                           | 29 |
| 4.6.1. Kompozitne tlačne posude .....  | 30 |
| 4.6.2. Kompozitni cjevovodi pod visokim tlakovima [11] .....                                 | 32 |
| 4.6.3. Zaštita čeličnih cjevovoda kompozitnim materijalima [12] .....                        | 33 |
| 4.6.3.1. Pristupi i metode zaštite cjevovoda .....   | 33 |

|  |    |
|--|----|
| 5. ZAVARIVANJE .....   | 37 |
| 5.1. Zavarivanje tlačne opreme.....  | 37 |
| 5.2. REL postupak zavarivanja.....   | 38 |
| 5.2.1. Parametri zavarivanja pri REL postupka zavarivanja .....                      | 38 |
| 5.2.2. Karakteristike REL postupka [14].....   | 39 |
| 5.2.3. Vrste obloga elektrode kod REL postupka zavarivanja [14] .....                | 40 |
| 5.2.4. Pogreške kod REL postupka zavarivanja [14] .....                              | 41 |
| 5.3. TIG postupak zavarivanja.....   | 41 |
| 5.3.1. Karakteristike TIG postupka zavarivanja [14] .....                            | 42 |
| 5.3.2. Karakteristike izvora struje kod TIG postupka zavarivanja.....                | 43 |
| 5.3.3. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja.....                            | 43 |
| 5.3.4. Pogreške kod TIG postupka zavarivanja [17] .....                              | 44 |
| 5.4. Kombinacija TIG + REL za zavarivanje tlačne opreme [15].....                    | 46 |
| 6. OSIGURAVANJE SUSTAVA KVALITETE ZAVARIVANJA PRI IZRADI TLAČNE OPREME.....          | 47 |
| 6.1. Postupci kontrole [18] .....  | 47 |
| 6.1.1. Kontrola prije početka zavarivanja [18].....                                  | 47 |
| 6.1.2. Kontrola tijekom postupka zavarivanja [18].....                               | 48 |
| 6.1.3. Kontrola nakon zavarivanja [18].....  | 49 |
| 6.2. Vizualna kontrola [18].....   | 50 |
| 6.2.1. Vizualna kontrola pripreme spoja prije početka postupka zavarivanja [18]..... | 50 |
| 6.2.2. Vizualna kontrola tijekom zavarivanja [18].....                               | 50 |
| 6.2.3. Vizualna kontrola nakon zavarivanja [18] .....                                | 51 |
| 6.3. Nerazorne metode kontrole zavarenih spojeva [18].....                           | 52 |
| 6.3.1. Metoda prozračivanja [18] .....   | 52 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 6.3.2.   | Metoda prozvučivanja [18] .....   | 53 |
| 6.3.3.   | Magnetska metoda [18].....  | 54 |
| 6.3.4.   | Ostale nerazorne metode kontrole zavarenih spojeva [18] .....                         | 54 |
| 6.3.5.   | Dokumentacija .....   | 55 |
| 6.4.     | Osnovni mjerni uređaji pri nadzoru zavarivanja [18].....                              | 56 |
| 6.4.1.   | Mjerenje parametara zavarivanja [18].....   | 56 |
| 6.5.     | Pregledi i ispitivanja opreme pod tlakom visoke razine sigurnosti [19] .....          | 57 |
| 6.5.1.   | Vanjski pregled [19].....   | 58 |
| 6.5.1.1. | Vanjski pregled cjevovoda.....  | 58 |
| 6.5.2.   | Unutarnji pregled [19].....   | 59 |
| 6.5.3.   | Ispitivanje tlakom.....   | 60 |
| 6.6.     | Sigurnosni pribor [1] .....   | 60 |
| 6.7.     | Potrebe proizvođača tlačne opreme za osiguravanje sustava kvalitete zavara [15] ..... | 61 |
| 7.       | EKSPERIMENTALNI RAD [20].....   | 63 |
| 7.1.     | Opis i karakteristike isparivača UMP-1800.....  | 66 |
| 7.1.1.   | Tehničke karakteristike .....   | 66 |
| 7.1.2.   | Ocjena kategorije sukladnosti .....   | 67 |
| 7.1.3.   | Projektiranje isparivača UNP-1800.....  | 68 |
| 7.2.     | Odabir materijala za izradu isparivača UNP-1800 .....                                 | 69 |
| 7.3.     | Bitni sigurnosni zahtjevi pri izradi isparivača UNP-1800.....                         | 69 |
| 7.4.     | Analiza rizika.....   | 72 |
| 7.4.1.   | Potrebni priključci na isparivač UNP-1800 .....                                       | 74 |
| 7.5.     | Zavarivanje isparivača UNO-1800.....  | 75 |
| 7.5.1.   | Odabrani postupci zavarivanja.....  | 75 |



|   |    |
|---|----|
| 7.5.1.1. Atestirani zavarivači .....                          | 78 |
| 7.5.2. Dodatni material za zavarivanje.....                   | 78 |
| 7.6. Plan kontrole kvalitete .....                            | 79 |
| 7.6.1. Kontrola kvalitete zavarenih spojeva .....             | 81 |
| 7.7. Antikorozivna zaštita (AKZ) .....                        | 82 |
| 7.8. Tlačna proba .....                                       | 83 |
| 7.9. Potvrda o sukladnosti.....                               | 84 |
| 7.10. Izgled isparivača UNP-1800 .....                        | 85 |
| 7.11. Najproblematicniji dio izrade isparivača UNP-1800 ..... | 86 |
| 7.12. Moguća unapređenja procesa izrade .....                 | 87 |
| 8. ZAKLJUČAK .....  | 88 |
| 9. LITERATURA.....  | 89 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Shematski prikaz sudionika u procesu priznavanja, pregleda i ispitivanja opreme pod tlakom [2] ..... | 4  |
| Slika 2. Dijagram za ocjenu sukladnosti za a) [1].....  | 6  |
| Slika 3. Dijagram za ocjenu sukladnosti za b) [1].....  | 7  |
| Slika 4. Dijagram za ocjenu sukladnosti za cjevovode i grupu fluida a) [1].....                               | 8  |
| Slika 5. Kategorije modula prema kvalifikaciji tlačne opreme [1] .....  | 9  |
| Slika 6. CE oznaka sukladnosti [2] .....  | 10 |
| Slika 7. Kompozitna LPG tlačna posuda [9].....  | 31 |
| Slika 8. Hidrostatsko ispitivanje kompozitnog LPG tlačnog spremnika na 30 bara [9] .....                      | 31 |
| Slika 9. Konstrukcija ojačane termoplastične cijevi [11].....   | 32 |
| Slika 10. Izgled AEGIS Rockshield mreže [13] .....  | 35 |
| Slika 11. Shematski prikaz pregledavanja i ispitivanja opreme pod tlakom prema pravilniku [2]                 | 58 |
| Slika 12. Certifikat tvrtke Macel plin d.o.o. [20] .....  | 63 |
| Slika 13. Certifikat područja aktivnosti u kojem djeluje tvrtka Macel plin d.o.o. [20] .....                  | 64 |
| Slika 14. Certifikat tvrtke Macel plin d.o.o za proizvodnju u skladu Pravilnika o tlačnoj opremi [20] .....   | 65 |
| Slika 15. Dijagram za ocjenu kategorije sukladnosti [20].....   | 67 |
| Slika 16. Lista WPS-ova korištenih pri proizvodnji isparivača UNP-1800 [20] .....                             | 76 |
| Slika 17. Primjer WPS-a za zavarivanje ojačanja kod isparivača UNP-1800 [20].....                             | 77 |
| Slika 18. Lista dodatnog materijala za zavarivanje isparivača UNP-1800 [20].....                              | 79 |
| Slika 19. Prvi dio plana kontrole kvalitete, prije početka izrade [20].....                                   | 80 |
| Slika 20. Drugi dio plana kontrole kvalitete, prije početka izrade [20] .....                                 | 80 |
| Slika 21. Postupak provođenja tlačne probe na isparivaču UNP-1800 [20] .....                                  | 83 |
| Slika 22. Potvrda o sukladnosti za isparivač UNP-1800 [20].....   | 84 |
| Slika 23. Isparivač UNP-1800 (nacrt i bokocrt) [20] .....   | 85 |
| Slika 24. Isparivač UNP-1800 (tlocrt) [20].....   | 86 |

**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Popis modula za ocjenu sukladnosti [1].....  | 9  |
| Tablica 2. Ovisnost vrijednosti ekvivalenta ugljika i zavarljivosti materijala [8] .....        | 28 |
| Tablica 3. Uzroci prekomjerne potrošnje elektrode i moguća rješenja [17] .....                  | 44 |
| Tablica 4. Uzroci neredovitog električnog luka i moguća rješenja [17] .....                     | 45 |
| Tablica 5. Uzroci neželjenog uključka volframa i oksida u zavarima i moguća rješenja [17] ..... | 45 |
| Tablica 6. Uzroci poroznosti zavara i moguća rješenja [17].....                                 | 45 |
| Tablica 7. Uzroci neispravnog korištenja zaštitnih plinova i moguća rješenja [17] .....         | 46 |
| Tablica 8. Dimenzije isparivača UMP-1800 [20] .....   | 67 |
| Tablica 9. Projektni podaci za isparivač UNO-1800 [20].....                                     | 68 |
| Tablica 10. Komponente isparivača i odabrani materijali s odgovarajućim normama [20] .....      | 69 |
| Tablica 11. Bitni sigurnosni zahtjevi pri izradi isparivača UNP-1800 [20].....                  | 70 |
| Tablica 12. Analiza rizika: uzroci, posljedice i mjere zaštite [20] .....                       | 72 |
| Tablica 13. Priključci na isparivaču UNP-1800 [20] .....  | 75 |
| Tablica 14. Vrsta i opseg nerazornih ispitivanja zavara (NDT) [20] .....                        | 81 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b>      | <b>Jedinica</b>   | <b>Opis</b>  |
|--------------------|-------------------|--|
| A                  | %                 | Istezljivost   |
| A <sub>80mm</sub>  | %                 | Istezljivost za L <sub>O</sub> = 80 mm                               |
| Ce                 | %                 | Ekvivalent ugljika   |
| DN                 | mm                | Nazivni promjer posude   |
| I                  | A                 | Struja zavarivanja   |
| PS                 | bar               | Najveći dopušteni (radni) tlak                                       |
| R <sub>eT</sub>    | N/mm <sup>2</sup> | Granica razvlačenja pri najvišoj radnoj temperaturi T <sub>max</sub> |
| R <sub>m</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | Vlačna čvrstoća  |
| R <sub>m,max</sub> | N/mm <sup>2</sup> | Maksimalna vlačna čvrstoća   |
| T <sub>max</sub>   | °C                | Najviša dopuštena (radna) temperatura                                |
| T <sub>min</sub>   | °C                | Najniža dopuštena (radna) temperatura                                |
| U                  | V                 | Napon  |
| V                  | l                 | Volumen  |
| v <sub>z</sub>     | cm/min            | Brzina zavarivanja   |
| v <sub>ž</sub>     | m/min             | Brzina žice  |
| Q <sub>pl</sub>    | l/min             | Protok plina   |

**POPIS KRATICA**

| <b>Kratika</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| AC             | eng. Alternating current (Izmjenična struja)  |
| ASME           | eng. American Society of Mechanical Engineers (Američko udruženje inženjera strojarstva)                  |
| AWS            | eng. American welding society (Američko društvo za zavarivanje)   |
| BW             | eng. Butt Weld (Čeoni zavar)  |
| CE             | eng. European Conformity (Oznaka sukladnosti tlačne opreme)   |
| DC             | eng. Direct current (Istosmjerna struja)  |
| FRP            | eng. Fibre-reinforced polymer (Polimer ojačan vlaknima)   |
| FBE            | eng. Fusion Bonded Epoxy (Fuzijski vezan epoksid)   |
| FW             | eng. Fillet Weld (Kutni zavar)  |
| GTAW           | eng. Gas Tungsten Arc Welding (Zavarivanje volframovom elektrodom u prisutnosti inertnog plina)           |
| HDPE           | eng. High density polyethylene (Polietilen visoke gustoće)  |
| IIW            | eng. International Institute of Welding (Međunarodni institut za zavarivanje)                             |
| IWE            | eng. International Welding Engineer (Međunarodni inženjer zavarivanja)                                    |
| IWS            | eng. International Welding Specialist (Međunarodni specijalist zavarivanja)                               |
| IWT            | eng. International Welding Technologist (Međunarodni tehnolog zavarivanja)                                |
| LPG            | eng. Liquefied petroleum gas (Ukapljeni naftni plin)  |
| MAG            | eng. Metal Active Gas (Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina) |
| MIG            | eng. Metal Inert Gas (Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina)  |

|      |   |
|------|---|
| MMA  | eng. Manual Metal Arc Welding (Ručno elektrolučno zavarivanje = REL)                              |
| NDT  | eng. Non Destructive Testing (Nerazorna ispitivanja)  |
| NPT  | eng. National Pipe Thread (Standardni navoj za cijevi)  |
| PD   | eng. Design Pressure (Projektni tlak)   |
| PE   | eng. Polyethylene (Polietilena)   |
| PET  | eng. Polyethylene terephthalate (Polietilen tereftalat)   |
| PN   | eng. Pressure Nominal (Nazivni tlak)  |
| PIB  | eng. Polyisobutene (Poliizobutena)  |
| PP   | eng. Polypropylene (Polipropilen)   |
| REL  | Ručno elektrolučno zavarivanje  |
| RF   | eng. Raised face (Prirubnica s podignutom dosjednom površinom)                                    |
| RTP  | eng. Reinforced thermoplastic pipe (Ojačana termoplastična cijev)                                 |
| SMAW | eng. Shielded metal arc welding (Ručno elektrolučno zavarivanje)                                  |
| TIG  | eng. Tungsten Inert Gas (Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina) |
| WN   | eng. Weld neck (flange) (Prirubnica s vratom za zavarivanje)                                      |
| WPS  | eng. Welding Procedure Specification (Specifikacija postupka zavarivanja)                         |
| WPAR | eng. Welding Procedure Approval Record (Zapis o odobrenju postupka zavarivanja)                   |
| WPQR | eng. Welding Procedure Qualification Record (Zapis o kvalifikaciji zavarivača)                    |

## **SAŽETAK**

Ovaj završni rad temelji se na analizi zahtjeva u proizvodnji tlačne opreme, s posebnim naglaskom na cjevovode i tlačne posude izrađene postupkom zavarivanja.

U teorijskom dijelu rada analizirani su relevantni pravilnici, regulative i norme koje se primjenjuju pri projektiranju, proizvodnji i kontroli opreme pod tlakom. Detaljno su opisani svi ključni koraci u konstruiranju tlačnih posuda i cjevovoda, uključujući odabir odgovarajućeg materijala i postupka zavarivanja. Također su navedena neka suvremena rješenja u proizvodnji i zaštiti tlačne opreme, poput primjene kompozitnih materijala. Dodatno, obrađen je pregled obveza proizvođača tlačne opreme, uključujući nužne resurse i postupke potrebne za osiguravanje visokih standarda sigurnosti i kvalitete u proizvodnji.

Eksperimentalni dio rada opisuje proces proizvodnje i pripadajuću dokumentaciju za čeličnu tlačnu posudu, na primjeru isparivača UNP-1800. Analizirana je odabrana tehnologija zavarivanja te ocijenjena sukladnost kvalifikacija postupaka zavarivanja i osoblja uključenog u proizvodnju. Priložena je dokumentacija koja dokazuje sljedivost proizvodnje i kvalitetu zavarenih spojeva. Na kraju je analizirano najkritičniji dio izrade u proizvodnom procesu te su predložene mjere za unapređenje proizvodnog procesa.

**Ključne riječi:** tlačna oprema, ocjena sukladnosti, zavarivanje, osiguravanje kvalitete

## **SUMMARY**

This final project focuses on the analysis of requirements in the manufacturing of pressure equipment, with a particular emphasis on pipelines and pressure vessels fabricated using welding processes.

The theoretical part of the project examines relevant regulations, standards, and norms applicable to the design, manufacturing, and inspection of pressure equipment. It provides a detailed overview of the key steps in designing pressure vessels and pipelines, including material selection and welding process determination. Additionally, modern solutions for pressure equipment manufacturing and protection, such as the application of composite materials, are discussed. Furthermore, an overview of the obligations of pressure equipment manufacturers is provided, including the essential resources and procedures required to maintain high standards of safety and quality in production.

The experimental part of the project describes the manufacturing process and corresponding documentation for a steel pressure vessel. The selected welding technology is analyzed, and the compliance of welding procedure qualifications and personnel involved in production is assessed. Supporting documentation is provided to verify production traceability and the quality of welded joints. Finally, critical areas within the production process are identified, and measures for process optimization are proposed.

**Keywords:** pressure equipment, conformity assessment, welding, quality assurance.



## 1. UVOD

Tlačna oprema obuhvaća razne posude, cjevovode, sigurnosni i tlačni pribor, uključujući elemente koji su pripojeni dijelovima pod tlakom, poput prirubnica, spojnice i drugih sličnih dijelova. Prema Pravilniku o tlačnoj opremi (NN 79/2016), tlačna oprema odnosi se na svu opremu koja se izrađuje i stavlja na tržište kao zaseban proizvod ili sklop, a mora imati oznaku sukladnosti, odgovarajući certifikat izdan od certificiranog tijela za ocjenu sukladnosti te izjavu o sukladnosti proizvođača. Pravilnik se primjenjuje na konstruiranje, proizvodnju i ocjenjivanje sukladnosti tlačne opreme i sklopova s najvećim dopuštenim tlakom PS većim od 0,5 bar. [1]

Stalni razvoj tehnologije i promjene tržišta povećali su raznovrsnost i kompleksnost tlačne opreme. To otežava jednoznačno definiranje zahtjeva i pravila kojih se treba pridržavati tijekom konstruiranja i proizvodnje takve opreme. Zahtjevi i pravila ovise o složenosti opreme i stupnju rizika. Na primjer, zahtjevi na konstruiranje i proizvodnju jednostavne posude za komprimirani zrak značajno se razlikuju od zahtjeva konstruiranja i proizvodnje kompleksnih sustava poput mjerno-redukcijskih stanica (MRS), iako obje vrste spadaju u kategoriju tlačne opreme. Osim tehničkih zahtjeva, ključni faktori koje treba uzeti u obzir su svojstva fluida u opremi, unutarnji i vanjski tlak, temperatura te razni drugi unutarnji i vanjski uvjeti. Ovisno o analiziranim parametrima, tlačna oprema može se podijeliti na opremu niske i visoke razine opasnosti. Proizvođači su dužni provesti analizu i predvidjeti sve potencijalne opasnosti koje najčešće proizlaze zbog visokog tlaka te, na temelju provedene analize, konstruirati i proizvoditi opremu koja osigurava visok stupanj zaštite zdravlja i sigurnosti. [1]

U ovom radu provodi se analiza zahtjeva za izradu cjevovoda i posuda pod tlakom postupkom zavarivanja. Fokus je na definiranju ključnih elemenata, pristupu konstruiranja, odabiru odgovarajućih materijala te primjeni optimalne tehnologije proizvodnje i kontrole, koja zadovoljava postavljene standarde kvalitete i sigurnosti.

Cjevovodi se definiraju kao cijevne komponente namijenjene za distribuciju fluida, povezane tako da čine tlačni sustav. Oni uključuju cijevi, spojene elemente (poput koljena, T-komada i redukcija), dilatacijske spojnice, crijeva te druge dijelove pod tlakom. Izmjenjivači topline koji sadrže cijevi, a čija je svrha hlađenje ili zagrijavanje fluida, također se smatraju cjevovodima. Posude, s druge

strane, predstavljaju zatvorene prostore konstruirane i izrađene s ciljem zadržavanja fluida pod tlakom. Posude mogu sadržavati jednu ili više komora, ovisno o namjeni. [1]

Materijali koji se koriste pri izradi cjevovoda i posuda moraju zadovoljiti stroge kriterije sigurnosti. Oni uključuju visoku tvrdoću, čvrstoću, žilavost i otpornost na povišene temperature i zamor materijala, jer tlačna oprema mora podnositi ekstremne uvjete bez gubitka svojih osnovnih mehaničkih svojstava. Zavarivanje je najčešće korištena tehnologija u proizvodnji tlačne opreme zbog svoje pouzdanosti i mogućnosti zadovoljavanja visokih standarda sigurnosti i kvalitete.

Naposljetku, može se zaključiti da će, pridržavanjem svih nužnih koraka pri konstruiranju, proizvodnji i kontroli kvalitete, koji su propisani pravilnikom o tlačnoj opremi i povezanim pravilnicima, sigurnost biti zadovoljavajuća. Osiguranje sigurnosti predstavlja ključni cilj, s obzirom na to da je riječ o zaštiti ljudskih života, što zahtijeva potpunu usklađenost s propisima i visok nivo odgovornosti.

## 2. PRAVILNICI O OPREMI POD TLAKOM

Sigurnost opreme pod tlakom od ključne je važnosti za korisnike, zbog čega su razvijeni brojni pravilnici i smjernice za proizvodnju takve opreme. Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske uskladilo je te pravilnike sa zakonodavstvom Europske unije. Tako je 2009. godine izdana "Zbirka naputaka iz područja opreme pod tlakom", koja obuhvaća pravne okvire i tehničke smjernice za projektiranje, proizvodnju i korištenje tlačne opreme.

Zbirka uključuje niz pravilnika koji reguliraju različite aspekte tlačne opreme, uključujući:

- Pravilnik o tlačnoj opremi, (NN 79/2016)
- Pravilnik o jednostavnim tlačnim posudama, (NN 27/2016)
- Pravilnik o pokretnoj tlačnoj opremi, (NN 91/2013)
- Pravilnik o aerosolnim raspršivačima, (NN 45/2014)
- Pravilnik o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom (NN 27/2017)
- Pravilnik o postupku ocjene sukladnosti opreme pod tlakom na temelju isprava o sukladnosti izdanih u inozemstvu (NN 126/2008) [2]

Osim što se navedeni pravilnici redovno ažuriraju radi usklađivanja s tehničkim i pravnim zahtjevima, njihova osnovna struktura i ciljevi ostaju nepromijenjeni, radi toga ovdje su navedena najnovija izdanja pravilnika. Oni postavljaju standarde za sve sudionike u procesu proizvodnje i uporabe tlačne opreme, uključujući proizvođače, uvoznike, distributere, kao i osobe zadužene za inspekcije i ocjenu sukladnosti.

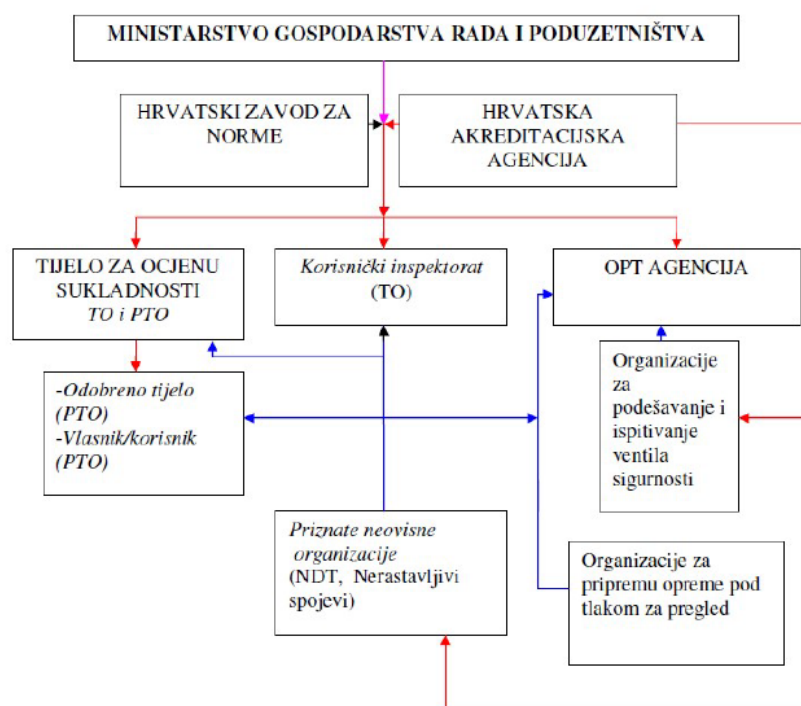
Područje primjene navedenih pravilnika obuhvaća:

- Proizvodnju, uvoz, stavljanje na tržište i upotrebu opreme pod tlakom,
- Ocjenjivanje sukladnosti opreme pod tlakom,
- Ispitivanja i preglede opreme pod tlakom,
- Ponovno ocjenjivanje sukladnosti opreme pod tlakom,

- Nadzor tržišta i rada postojeće opreme pod tlakom [2]

Unutar zbirke naputaka jasno su definirani zahtjevi za ponašanje i postupanje svih subjekata koji imaju doticaj s opremom pod tlakom. Njihovo provođenje ključno je za osiguranje visokog stupnja sigurnosti i zaštite zdravlja u svim industrijskim granama u kojima se oprema pod tlakom koristi. [2]

U procesima ocjene i certifikacije tlačne opreme sudjeluje niz subjekata koje mora proći svaka tlačna oprema, kako bi se pravilno pregledala i ispitata te na kraju dobila potrebnu potvrdu da je sve načinjeno prema zahtjevima o tlačnoj opremi, jer je sigurnost prilikom korištenja tlačne opreme od ključne važnosti, a spomenuti lanac sudionika u procesu priznavanja je prikazan i na slici 1. [2]



**Slika 1. Shematski prikaz sudionika u procesu priznavanja, pregleda i ispitivanja opreme pod tlakom [2]**

Proces pregleda i ispitivanja tlačne opreme uključuje pažnju na ključne sigurnosne zahtjeve kojih se proizvođač opreme pod tlakom mora držati.

## 2.1. Procjena razine opasnosti tlačne opreme [1]

U pravilniku o tlačnoj opremi navodi se koje osnovne sigurnosne zahtjeve moramo zadovoljiti za posude i cjevovode pod tlakom. Oni ovise o sljedećim parametrima: vrsti medija, veličini posude i tlaku, te kako svrstati tlačnu opremu u određene kategorije opasnosti i njima pripadajuće module za ocjenu sukladnosti, čime se omogućuje identifikacija ključnih zahtjeva za kontrolu i ispitivanje tijekom projektiranja i uporabe tlačne opreme.

Prema tome podjelu vršimo ovisno o kojem je fluidu riječ, a za potrebe ovakvog klasificiranja tlačne opreme fluidi se dijele u dvije skupine.

Grupa 1 obuhvaća opasne fluide kao što su:

- Zapaljivi, oksidirajući plinovi
- Zapaljivih, oksidirajućih, pirofornih tekućina i krutina
- Organski peroksidi
- Samoreagirajuće tvari i smjese
- Tvari i smjese koje u dodiru s vodom otpuštaju zapaljive plinove
- Tvari s akutnom oralnom, dermalnom i inhalacijskom toksičnošću
- Tvari koje uzrokuju specifičnu toksičnost za ciljane organe – jednokratno izlaganje

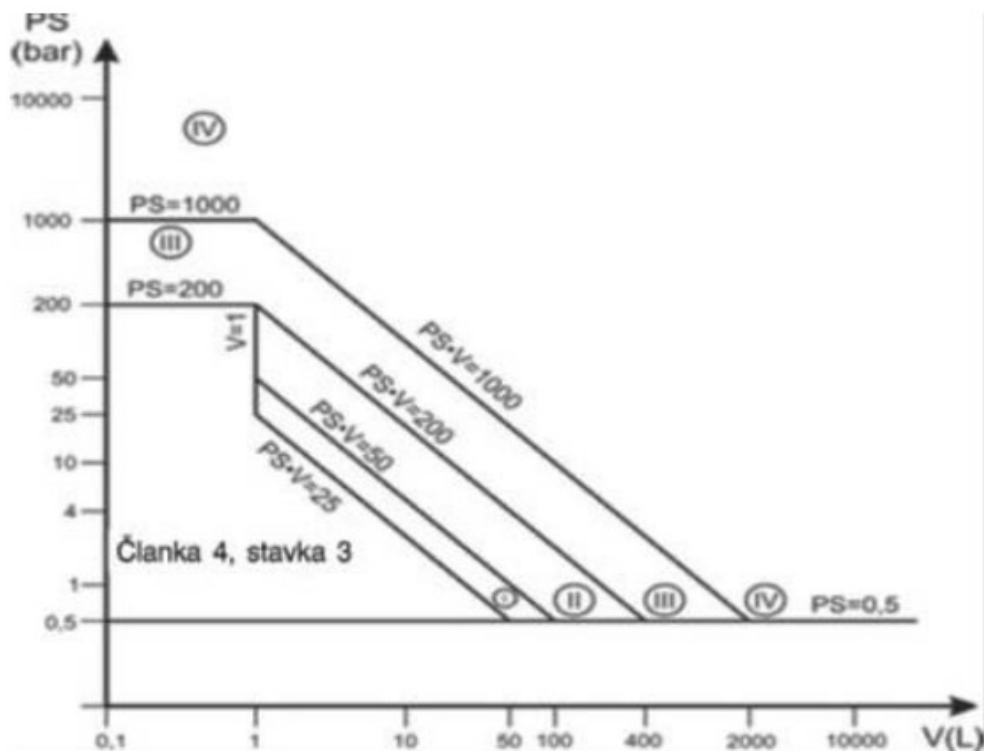
Grupu 2 čine svi fluidi koji nisu navedeni u Grupi 1, a čija uporaba ne predstavlja značajniji rizik za sigurnost pri korištenju.

Kada se odredi o kojoj je grupi fluida riječ preostaje nam odrediti kojoj kategoriji opasnosti pripada neka tlačna oprema, a to osim o grupi fluida ovisi o veličini same posude i tlaku unutar posude ili cjevovoda, pri čemu se analiziraju parametri koji određuju razinu potencijalne opasnosti.

U slučaju posuda pod tlakom:

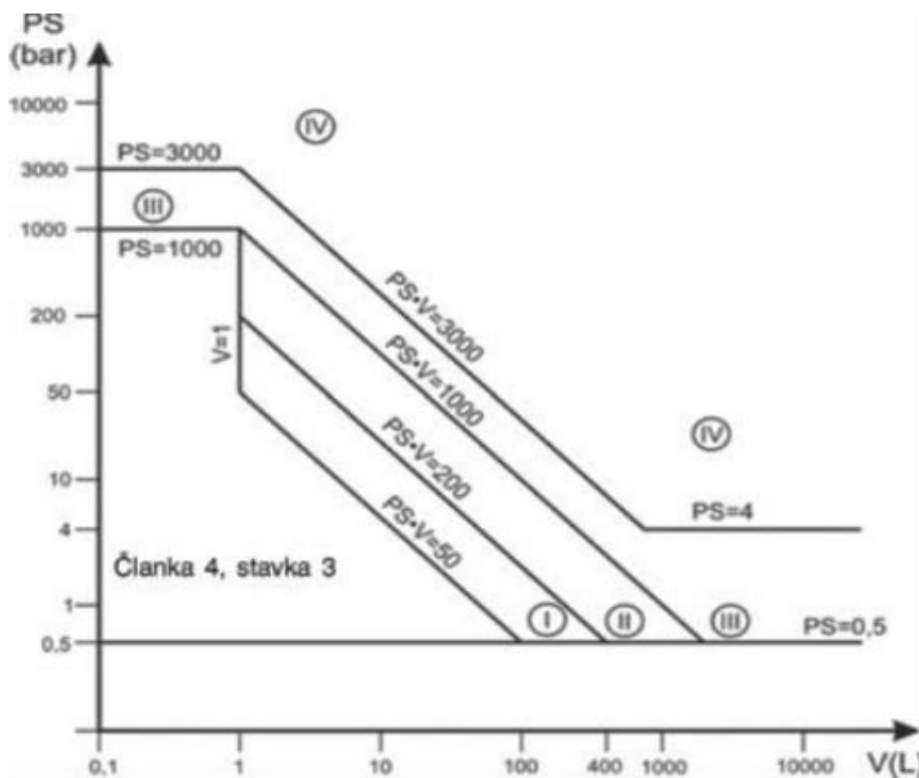
Kategorija i razina opasnosti određuju se na temelju dijagrama koji uzimaju u obzir vrstu medija, veličinu posude i tlak, iz pravilnika o tlačnoj opremi:

- Za plinove, ukapljene plinove, pod tlakom otopljene plinove, pare te one kapljevine kod kojih tlak pare na najvišoj dopuštenoj temperaturi prelazi 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog tlaka (1013 mbar), u sljedećim granicama:
- a) Fluidi grupe 1. i volumena većeg od 1 L te umnoška PS i V većeg od 25 bar \* L ili tlaka PS većeg od 200 bar za ocjenu kategorije sukladnosti moramo se koristiti priloženim dijagramom na slici 2.:



Slika 2. Dijagram za ocjenu sukladnosti za a) [1]

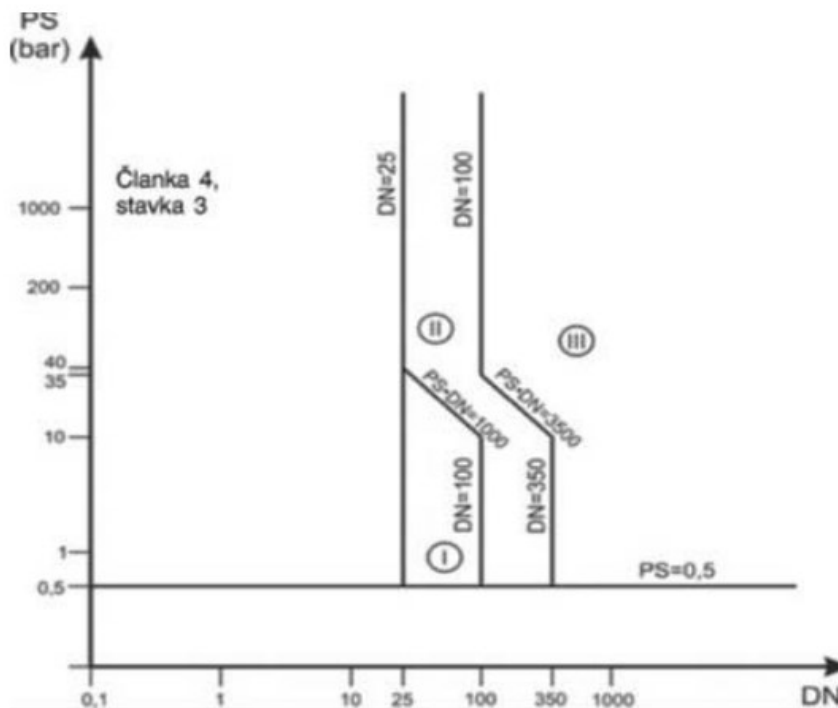
- b) Fluidi grupe 2. i volumena većeg od 1 L te umnoška PS i V većeg od 50 bar \* L ili tlaka PS većeg od 1000 bar te svi prenosivi aparati za gašenje požara i boce za disanje koristiti dijagramom prikazanim na slici 3.:



Slika 3. Dijagram za ocjenu sukladnosti za b) [1]

Isto tako ako su u pitanju cjevovodi pod tlakom namijenjene:

- Za plinove, ukapljene plinove, pod tlakom otopljene plinove, pare te one kapljevine kod kojih tlak pare na najvišoj dopuštenoj temperaturi prelazi 0,5 bar iznad standardnog atmosferskog tlaka (1013mbar), a radi se o:
  - a) Fluidima grupe 1. s DN većim od 25 koristimo se priloženim dijagramom za ocjenu sukladnosti prikazanim na slici 4.:



**Slika 4. Dijagram za ocjenu sukladnosti za cjevovode i grupu fluida a) [1]**

Za sve ostale situacije, prilikom određivanja kategorija i razina opasnosti, koriste se raspoloživi dijagrami navedeni u Pravilniku o tlačnoj opremi u „Dodatku II. – Dijagrami za ocjenu sukladnosti“. Ovisno o vrsti medija, veličini posude ili cjevovoda te tlaku, odabire se odgovarajući dijagram koji se koristi za određivanje kategorije ocjene sukladnosti tlačnih posuda ili cjevovoda.

## 2.2. Postupci ocjene sukladnosti i CE oznaka

Nakon što se odredi kategorija tlačne opreme, moguće je definirati odgovarajuće postupke za ocjenu sukladnosti, te koji su minimalni kriteriji koje mora zadovoljiti tijelo za ocjenu sukladnosti, kako bi se oprema pod tlakom mogla staviti na tržište i u uporabu. Podjelu kategorija tlačne opreme i modula vidimo na slici 5.



|      |   |   |
|------|---|---|
| I.   | = | Modul A   |
| II.  | = | Moduli A2, D1, E1   |
| III. | = | Moduli<br>B (tip - konstrukcija) + D,<br>B (tip - konstrukcija) + F,<br>B (tip - proizvodnja) + E,<br>B (tip - proizvodnja) + C2, H |
| IV.  | = | Moduli<br>B (tip - proizvodnja) + D,<br>B (tip - proizvodnja) + F,<br>G, H1   |

**Slika 5. Kategorije modula prema kvalifikaciji tlačne opreme [1]**

Detaljni opisi svakog modula, odnosno postupaka za ocjenu sukladnosti, navedeni su u Pravilniku o tlačnoj opremi u 'Dodatku III', dok je u ovom dijelu rada u tablici 1., dan sažeti opis svakog od modula za ocjenu sukladnosti.

**Tablica 1. Popis modula za ocjenu sukladnosti [1]**

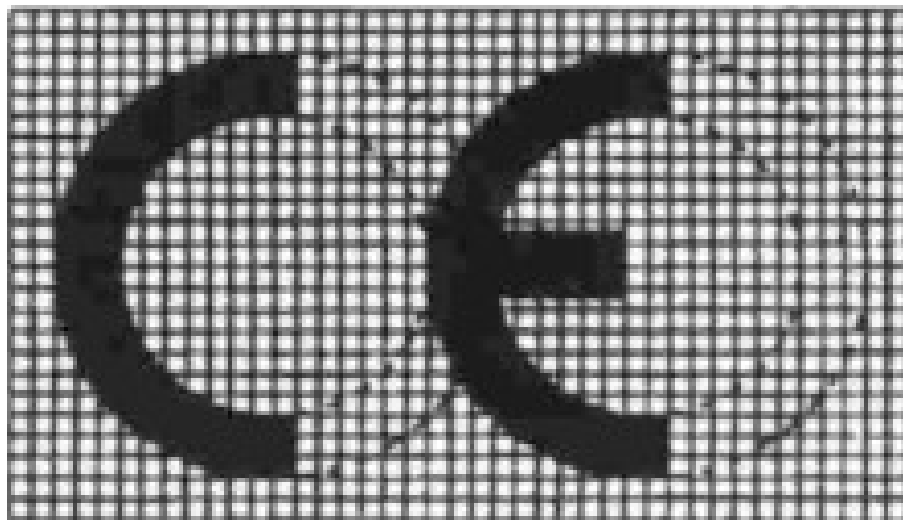
|    |   |
|----|---|
| A  | Unutarnja kontrola proizvodnje  |
| A1 | Unutarnja kontrola proizvodnje uz nadzirane provjere tlačne opreme u nasumično odabranim vremenskim razmacima                               |
| B  | Eu-pregled tipa   |
| C2 | Sukladnost s tipom na temelju unutarnje kontrole proizvodnje i nadziranih provjera tlačne opreme u nasumično odabranim vremenskim razmacima |
| D  | Sukladnost s tipom na temelju osiguranja kvalitete proizvodnog postupka   |
| D1 | Osiguranje kvalitete proizvodnog postupka   |
| E  | Sukladnost s tipom na temelju osiguranja kvalitete tlačne opreme  |
| E1 | Osiguranje kvalitete završne inspekcije i ispitivanja tlačne opreme   |
| F  | Sukladnost s tipom na temelju provjere tlačne opreme  |
| G  | Sukladnost na temelju pojedinačne provjere  |
| H  | Sukladnost temeljena na potpunom osiguravanju kvalitete   |
| H1 | Sukladnost na temelju potpunog osiguranja kvalitete s pregledom konstrukcije  |

Ako tijekom ocjenjivanja sukladnosti nadležno inspekcijsko tijelo utvrdi da pojedina tlačna oprema ili sklopovi nisu izrađeni u skladu sa zahtjevima pravilnika o tlačnoj opremi dužni su

zahtijevati da se provedu svi nužni popravci ako je to moguće, ili da se oprema potpuno povuče s tržišta ili iz pogona. Odluka o povlačenju opreme uvelike ovisi o razini opasnosti koja je povezana s otkrivenom nesukladnošću. [1]

Kao što su definirani moduli za ocjenu sukladnosti, uveden je i jedinstveni način označavanja proizvoda oznakom sukladnosti, pri čemu za označavanje tlačne opreme pod tlakom koristimo CE oznaku. CE oznaka potvrđuje da tlačna oprema zadovoljava sve relevantne zahtjeve Direktive 97/23/EC (danas je to Direktiva 2014/68/EU) o tlačnoj opremi, koji se odnose na sigurnost i tehničke specifikacije. Proizvođač tlačne opreme dužan je staviti CE oznaku na opremu prije nego je stavi na tržište, a oznaka se stavlja nakon što su svi potrebni postupci kontrole završeni tijekom proizvodnje. [2]

Prema Pravilniku o tlačnoj opremi, CE oznaku treba postaviti na vidljivo mjesto na svakom elementu tlačne opreme ili na njegovoj tehničkoj pločici. Oznaka mora biti čitljiva i neizbrisiva. Ako zbog specifičnosti opreme ili sklopa nije moguće postaviti oznaku direktno na opremu, oznaka se prilaže uz prateću dokumentaciju ili na pakiranje proizvoda. Nije potrebno postavljati oznaku CE na svaki pojedinačni element opreme koja čini sklop, no elementi koji već imaju oznaku prilikom ugradnje u sklop zadržavaju tu oznaku. [1]



**Slika 6. CE oznaka sukladnosti [2]**

### 2.3. Norme pri izradi tlačne opreme

Pravilnici o tlačnoj opremi obvezuju proizvođače na primjenu određenih normi. Slijedeći određene norme, proizvođač može dokazati sukladnost proizvoda s postavljenim ključnim zahtjevima.

Glavne značajke normi su da se temelje na provjerenim znanstvenim, tehničkim i iskustvenim rezultatima i usmjerene su na promicanje najboljih prednosti za društvo i time predstavljaju dogovornu osnovu za procjenjivanje proizvoda, procesa ili pružanja usluga, posebno s obzirom na sigurnosne zahtjeve i sprječavanje ozljeđivanja. Norme također nude nedvosmislene tehničke kriterije koji su univerzalno prepoznatljivi i primjenjivani. [3]

Ključni ciljevi normizacije uključuju:

- Osiguranje prikladnost proizvoda, procesa ili usluge jer omogućavaju jednostavno praćenje dokumentacije, osiguravajući sljedivost procesa i pouzdanosti;
- Povećanje razine sigurnosti proizvoda, procesa ili usluga, čuvanja zdravlja, života ljudi i životinja te zaštite okoliša jer nam definiraju jasne zahtjeve za opremu i osoblje te nam daju smjernice kako provoditi testiranja i inspekcije kako bi minimalizirali rizik;
- Poboljšanje proizvodne učinkovitosti i odgovorno gospodarenje jer standardizirani procesi i alati omogućuju bržu proizvodnju;
- Uklanjanje tehničkih zapreka u međunarodnoj trgovini jer norme poput ISO i EN su međunarodni standard i omogućavaju da je proizvod priznat u svijetu. [3]

Za potrebe izrade posuda i cjevovoda pod visokim tlakom, najvažnije su norme koje su usklađene s europskim sustavom normi. Te norme reguliraju kontrolu kvalitete i proizvodnju opreme pod tlakom i predstavljaju temelj za osiguravanje sustava kontrole kvalitete.

U Republici Hrvatskoj trenutno važeće norme koje svaki proizvođač opreme pod tlakom mora primjenjivati uključuju:

- HRN EN ISO 9001: Norma koja osigurava sustav upravljanja kvalitetom i predstavlja osnovu za sustavno upravljanje procesima unutar organizacije. Kada se primjenjuje u industrijama poput petrokemijske, naftne i plinske, ova norma mora biti usklađena s:

- HRN EN ISO 29001, koja specificira zahtjeve za sustave upravljanja kvalitetom u tim specifičnim sektorima, uzimajući u obzir njihove dodatne zahtjeve za kvalitetu;
- HRN EN ISO 14001: Norma koja postavlja okvire za sustave upravljanja okolišem s ciljem smanjenja negativnog utjecaja na okoliš i pridržavanja zakonskih obveza u tom području. [3]

Primjena ovih normi osigurava da su proizvodni procesi usklađeni s najvišim standardima kvalitete i sigurnosti te da istovremeno zadovoljavaju ekološke zahtjeve, čime se osigurava zaštita okoliša.

Pri proizvodnji opreme pod tlakom najčešće se koristi postupak zavarivanja, pri čemu se mora pridržavati popisa normi izdanih od strane Ministarstva gospodarstva Republike Hrvatske (NN 27/2013), a općenito se odnose na provjere o osposobljenosti zavarivača, specifikacije i kvalifikacije proizvodnog pogona i opreme za određenu tehnologiju zavarivanja. Osnovne norme pri izradi tlačnih posuda postupkom zavarivanja mogu se pronaći u popisu hrvatskih normi za primjenu pravilnika o tlačnoj opremi. [4]

Osim toga prilikom postupka zavarivanja, kako bi se osigurao sustav kontrole kvalitete zavarenih spojeva, slijede se i sljedeće norme:

- HRN EN ISO 3834- 1 do 6 :2021 - Ova serija normi definira zahtjeve za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala, uključujući zahtjeve za zavarivačko osoblje i kvalitetu proizvodnje;
- HRN EN ISO 14731:2019 - Ova norma obuhvaća koordinaciju zavarivanja, zadatke i odgovornosti, uključujući potrebne kvalifikacije i kompetencije osoblja koje je uključeno u zavarivanje;
- HRN EN ISO 5817:2023 – Norma koja se fokusira na razine kvalitete zavarenih spojeva u čeliku, niklu i titanu te na nepravilnosti u procesu zavarivanja;
- HRN EN ISO 9606-1:2017 - Ova norma definira kvalifikaciju koje zavarivač mora ispunjavati, odnosno ispitivanje zavarivača za zavarivanje taljenjem, posebno za čelike. [3]

Primjenom svih navedenih normi i povezanih pravila osigurava se sigurnost i pouzdanost proizvoda. Ovi postupci omogućuju dosljednost u proizvodnji, visoku kvalitetu i dugotrajnost opreme. Takav pristup jamči zadovoljstvo i sigurnost krajnjih korisnika, što predstavlja ključnu vrijednost u industriji tlačne opreme.

### 3. KONSTRUIRANJE TLAČNE OPREME PREMA PRAVILNICIMA

Tlačna se oprema mora konstruirati tako da poštujuemo sve propise koje nam zakon nalaže te uzimajući u obzir sve faktore i parametre koji bi mogli poremetiti sigurnost izrade i rada tlačne opreme za čitavo vrijeme njezina vijeka trajanja. Konstruiranje takve opreme temelji se na odgovarajućim koeficijentima sigurnosti i metodama za koje je poznato da imaju odgovarajuće sigurnosne granice za sve moguće probleme koje mogu uzrokovati razne opasnosti.

Prilikom odabira najprikladnijeg konstrukcijskog rješenja, moramo voditi računa da:

- Uklonimo ili umanjimo opasnosti u najvećoj mogućoj mjeri;
- Primijenimo odgovarajuće zaštitne mjere;
- Ako je opasnost gotovo nemoguće ukloniti, moramo obavijestiti korisnike o ostalim opasnostima te naznačiti je li potrebno poduzeti odgovarajuće posebne mjere zaštite kako bi se smanjili rizici za vrijeme ugradnje i uporabe;
- Spriječimo opasnost od zlouporabe ili ako to nije moguće, tako da postoji odgovarajuće upozorenje o tome da se tlačna oprema ne koristi na takav način. [1]

Kako bismo sve to osigurali potrebno je analizirati namjenu tlačne opreme te kojim će uvjetima rada ona biti najviše izložena. Prilikom analiziranja uvjeta rada i opasnostima kojima je tlačna oprema, a i njen korisnik izložen, proizvođač je dužan uzeti u obzir sve najnovije zakone, znanja i tehnološka dostignuća u vrijeme konstruiranja i proizvodnje, te na temelju tih analiza, konstruirati tlačnu opremu da bude što funkcionalnija, kvalitetnija, sigurnija i ekološki prihvatljivija. [1]

Prilikom analize i konstruiranja posebno se uzimaju u obzir sljedeći parametri:

- Unutarnji/vanjski tlak;
- Temperatura okoline i radna temperatura;
- Statički tlak i masa sadržaja u ispitnim uvjetima i uvjetima rada;
- Opterećenja vezana za promet, vjetar, potres;
- Sile reakcija i momenti koji proizlaze od oslonaca, priključaka, cijevi;
- Korozija i erozija, umor materijala;

- Razdvajanje nestabilnih fluida.

Isto tako potrebno je pretpostaviti da se ponekad opterećenja javljaju istodobno, uvažavajući mogućnost njihovog istovremenog djelovanja. [1]

Kada analizom definiramo sve potrebne sile, momente, tlakove, opterećenja, uvjete rada, utjecaj korozije, temperature i raznih vanjskih djelovanja poput vjetra ili potresa, konstruiramo tlačnu opremu za odgovarajuću čvrstoću, odnosno konstruiramo takav proizvod da izdrži sve vanjske i unutarnje utjecaje, a da ostane sigurna i funkcionalna cjelina. To nam omogućava da postignemo optimalnu ravnotežu između čvrstoće, trajnosti i ekonomičnosti.

Konstruiranje za odgovarajuću čvrstoću najčešće se temelji na metodi proračuna ili eksperimentalnoj metodi ako je umnožak najvećeg dopuštenog tlaka PS i volumena V manji od  $6000 \text{ bar} \cdot \text{L}$  ili ako je umnožak PS \* DN manji od 3000 bar. [1]

### 3.1. Metoda proračuna [1]

Metoda proračuna se sastoji od niza faktora koje je potrebno uzeti u obzir poput:

1. Tlačnih i drugih opterećenja:

Dopuštena naprezanja tlačne opreme ograničavaju se na temelju očekivanih i razumno predvidljivih načina otkazivanja tijekom radnih uvjeta. Kako bi se uklonile nesigurnosti koje proizlaze iz procesa proizvodnje, stvarnih radnih uvjeta, naprezanja, metoda proračuna te svojstava i ponašanja materijala, primjenjuju se odgovarajući faktori sigurnosti.

Za zadovoljavanje navedenih zahtjeva primjenjuju se sljedeće metode:

- Konstrukcija formulama;
- Konstrukcija analizom;
- Konstrukcija mehanikom loma.

Prema potrebi koriste se: samostalno, kombinirano ili kao dodatak jedne drugoj.

## 2. Izdržljivost

Prilikom konstruiranja tlačne opreme koriste se odgovarajući proračuni kako bi se osigurala njena izdržljivost u predviđenim radnim uvjetima.

Ovi proračuni temelje se na sljedećim načelima:

- Proračunski tlakovi ne smiju biti manji od najvećih dopuštenih tlakova te trebaju uzeti u obzir statički i dinamički tlak fluida, kao i razdvajanje nestabilnih fluida. Za posude podijeljene na više zasebnih komora koje su pod tlakom, pregradne stijenke moraju biti dimenzionirane prema najvećem mogućem tlaku jedne komore u odnosu na najmanji mogući tlak susjedne komore;
- Proračunske temperature trebaju biti odabrane tako da osiguravaju odgovarajuće sigurnosne granice u skladu s radnim uvjetima;
- Konstrukcija mora uzeti u obzir sve moguće kombinacije temperature i tlaka koje se mogu pojaviti u razumno predvidljivim uvjetima rada;
- Najveća dopuštena naprezanja i koncentracije naprezanja moraju biti unutar dopuštenih granica;
- Proračuni otpornosti na tlak temelje se na svojstvima materijala koja su definirana dokumentiranim podacima, u skladu s odredbama iz točke 4. te uzimajući u obzir odgovarajuće faktore sigurnosti.

Svojstva materijala koja se uzimaju u obzir uključuju:

- Konvencionalnu granicu razvlačenja pri proračunskoj temperaturi (0,2 % ili 1,0 % trajne deformacije, prema potrebi),
- Vlačnu čvrstoću,
- Otpornost puzanju,
- Otpornost na zamor materijala,
- Youngov modul (modul elastičnosti),
- Dopuštenu plastičnu deformaciju,
- Energiju loma savijanjem,
- Lomnu žilavost,



- Faktore zavarenog spoja prilagođene svojstvima materijala, vrsti ispitivanja bez razaranja te predviđenim uvjetima rada.

Dizajn također mora uzeti u obzir sve predvidljive mehanizme postupnog slabljenja materijala, poput korozije, puzanja i zamora, kako bi se osigurao dugotrajan rad opreme. U uputama iz točke 3.4. pravilnika o tlačnoj opremi (3.4. Upute za rad), posebno se obrađuju karakteristike dizajna koje se odnose na vijek trajanja opreme, uključujući:

- Planirano trajanje rada pri određenim temperaturama za otpornost na puzanje;
- Planirani broj ciklusa pri specifičnim razinama naprežanja za otpornost na zamor;
- Dodatke za koroziju kako bi se osigurala dugotrajnost.

### 3. Stabilnost

Ako proračunata debljina stijenke ne osigurava stabilnost konstrukcije, potrebno je poduzeti dodatne mjere za njezino osiguranje. Stabilnost konstrukcije mora se osigurati uzimajući u obzir sve predvidljive rizike, uključujući one koji nastaju tijekom prijevoza i rukovanja tlačnom opremom.

Ova analiza omogućava postizanje ravnoteže između čvrstoće, trajnosti i ekonomičnosti, uz osiguranje sigurne i pouzdane uporabe tlačne opreme tijekom njezinog planiranog vijeka trajanja.

#### **3.2. Eksperimentalna metoda [1]**

Konstruiranje temeljeno na eksperimentu po pravilniku o tlačnoj opremi je niz postupaka potrebnih da se:

- Konstrukcija tlačne opreme može djelomično ili u cijelosti potvrditi primjenom jasno definiranog programa ispitivanja. Ovaj se program provodi na reprezentativnom uzorku opreme ili određenoj kategoriji opreme i prethodno mora biti prihvaćen od strane prijavljenog tijela za ocjenjivanje sukladnosti u skladu s modulom ocjenjivanja konstrukcije, ako on postoji.

- Program ispitivanja uključuje definiranje uvjeta ispitivanja te kriterije prihvatanja ili odbijanja konstrukcije. Prije provođenja ispitivanja potrebno je provjeriti stvarne vrijednosti glavnih dimenzija te svojstava materijala od kojih je izrađena oprema.
- Tijekom ispitivanja, prema potrebi, omogućuje se praćenje kritičnih područja tlačne opreme korištenjem odgovarajućih instrumenata koji precizno bilježe naprezanja i deformacije.

Dok ispitni program obuhvaća niz testiranja kao što su:

- Izdržljivost na tlak, čija je svrha provjeriti da tijekom rada pri tlakovima unutar definiranih sigurnosnih granica oprema ne pokazuje značajna propuštanja niti deformacije koje prelaze dopuštene vrijednosti. Proračun ispitnog tlaka temelji se na razlikama između izmjerenih vrijednosti geometrijskih karakteristika i svojstava materijala u uvjetima ispitivanja, te proračunskih vrijednosti. Uzima se u obzir i razlika između ispitnih i proračunskih temperatura;
- Otpornost na puzanje i zamor, ako postoji rizik od puzanja ili zamora materijala, provode se odgovarajuća ispitivanja u skladu s predviđenim radnim uvjetima tlačne opreme, kao što su trajanje rada na određenim temperaturama ili broj ciklusa pri specifičnim razinama opterećenja;
- Kada je potrebno, provode se dodatna ispitivanja koja se odnose na druge faktore navedene u točki 2.2.1. iz pravilnika o tlačnoj opremi, poput otpornosti na koroziju ili vanjska oštećenja.

Zaključno, obje spomenute metode konstruiranja imaju ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i pouzdanosti tlačne opreme, proračunska metoda omogućuje precizno projektiranje temeljeno na teorijskim analizama i standardima, dok eksperimentalna metoda pruža praktičnu potvrdu traženih svojstva kroz ispitivanja pod stvarnim uvjetima.

### **3.3. Mjere za siguran rad i rukovanje [1]**

Konstruiranjem je potrebno, osigurati ispravne mjere za siguran rad i rukovanje, a posebna pažnja posvećuje se sljedećem:

- Opremu treba projektirati tako da omogućuje sigurno otvaranje i zatvaranje;
- Tlačna oprema se opremljuje sigurnosnim i rasteretnim napravama kako bi se spriječila opasna ispuštanja fluida;
- Projektiraju se uređaji koji onemogućuju fizički pristup dok je oprema pod tlakom ili vakuumom;
- Površinska temperatura mora biti prilagođena predviđenom načinu korištenja;
- Oprema mora biti dizajnirana tako da omogućuje sigurno razdvajanje nestabilnih fluida;
- Kada je moguće prekoračenje dopuštenih vrijednosti tlaka ili temperature, tlačna oprema mora biti opremljena sigurnosnim uređajima poput ventila za rasterećenje ili sustavima za praćenje koji omogućuju automatsko ili ručno sprječavanje nepovoljnih uvjeta;
- Korištenje materijala otpornih na toplinu i protupožarnih priključaka kako bi se spriječila opasnost od vanjskog požara.

Za tlačnu opremu s revizijskim otvorima obvezni su uređaji (ručni ili automatski) koji korisnicima omogućuju provjeru da otvaranje ne predstavlja rizik. Oprema mora sadržavati sigurnosni uređaj koji sprječava otvaranje dok god tlak ili temperatura fluida predstavljaju opasnost.

Prema potrebi ponekad se:

- Koriste zaštitne prevlake za sprječavanje kontakta s agresivnim tvarima kako bi se spriječio intenzivniji utjecaj korozije i kemijskog oštećenja;
- Povećanom debljinom materijala smanjuje utjecaj intenzivnog trošenja materijala, ili Omogućiti zamjenu dijelova podložnih trošenju

Ako je tlačna oprema ugrađena u sklop onda je potrebno osigurati da su međusobno pouzdano povezani i jednostavno sastavljeni u cjelinu. Pravilno konstruiranje i montaža osiguravaju ispravnost i dugotrajnost same opreme, a time i cijelog sklopa.

### **3.4. Konstruiranje cjevovoda prema Pravilniku o tlačnoj opremi [1]**

Kako bi se konstruiranjem i izradom cjevovoda osigurala njegova visoka sigurnost i funkcionalnost, potrebno je poduzeti sljedeće korake:

- Spriječiti rizik od prekomjernog naprezanja na odgovarajući način, uzimajući u obzir sile koje djeluju na ključne dijelove cjevovoda, poput prirubnica, priključaka, elastičnih veza ili spojnice. Posebna pažnja posvećuje se osloncima, uležištenjima, sidrenju, vođenju te pravilnoj upotrebi prednaprezanja;
- Korištenjem odgovarajućih sustava drenaže i uklanjanjem taloga na najnižim točkama cjevovoda kako bi se spriječila šteta uzrokovana hidrauličkim udarima ili korozijom, nastalih zbog kondenzacije plinova i para unutar cjevovoda;
- Potrebno je posvetiti posebnu pažnju mogućoj šteti uzrokovanoj turbulencijom ili vrtloženjem fluida u cjevovodu, uz primjenu dodatne debljine materijala ili uporabom prevlaka ili platiranjem;
- Rizik od umora materijala uzrokovano vibracijama u cijevima mora se minimizirati primjenom odgovarajućih konstrukcijskih rješenja, izbora materijala te redovitim ispitivanjima;
- U slučaju fluida iz skupine 1., potrebno je poduzeti dodatne sigurnosne mjere za zatvaranje odvojaka cjevovoda, osobito onih čija veličina predstavlja značajan sigurnosni rizik;
- Kako bi se spriječilo nenamjerno ispuštanje fluida, izlazi odvodnih sigurnosnih cijevi moraju biti jasno i trajno označeni s preciznom naznakom sadržanog fluida;
- Položaj i putanja podzemnih cjevovoda trebaju biti jasno označeni u tehničkoj dokumentaciji. Time se osigurava lakše i sigurnije održavanje, inspekcija te eventualni popravci.

Ove mjere osiguravaju dugotrajan rad i minimiziraju sigurnosne rizike za korisnike i okoliš. Njihova primjena ključna je u svim fazama, od projektiranja do završne inspekcije.

### **3.5. Konstruiranje tlačnih posuda prema Pravilniku o jednostavnim tlačnim posudama [5]**

Projektiranje jednostavne tlačne posude u skladu s Pravilnikom o jednostavnim tlačnim posudama, zahtijeva pridržavanje specifičnih tehničkih i sigurnosnih zahtjeva koji će omogućiti siguran i dugotrajan rad u predviđenim radnim uvjetima.

Prilikom konstruiranja jednostavnih tlačnih posuda proizvođač je obavezan definirati sljedeće parametre kao što su:

- Najniža radna temperatura ( $T_{\min}$ ) - ako je  $T_{\min}$  niža od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , materijal posude mora ispunjavati tražena svojstva za rad pri temperaturi od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Najvišu radnu temperaturu ( $T_{\max}$ )
- Najveći radni tlak (PS)

Proizvođač prilikom konstruiranja jednostavne tlačne posude mora osigurati funkcionalnosti i sigurnosti tako da:

- Omogući pregled unutrašnjosti posude, čime se olakšava inspekcija i održavanje;
- Osigura adekvatnu drenažu posude radi uklanjanja akumuliranih tekućina;
- Garantira postojanost mehaničkih svojstava posude tijekom cijelog predviđenog vijeka trajanja;
- Pruži odgovarajuću zaštitu od korozije, vodeći računa o namjeni i radnim uvjetima.

Opterećenja i uvjeti rada koje je proizvođač dužan uzeti u obzir da posuda ne smije biti izložena naprezanjima koja bi ugrozila sigurnost posude, a samim time i okoline. Zbog toga radni tlak ne smije trajno prelaziti najveći radni tlak (PS), s iznimkom kratkotrajnih prekoračenja do 10 %.

Pravilnik također propisuje važne tehničke zahtjeve za konstruiranje tlačnih posuda kao što su za:

- Zavarivanje - kružni i uzdužni zavari moraju biti potpuno provareni ili zavari istovjetne kvalitete. Ispupčene podnice, osim onih polukuglastih, moraju biti opremljene cilindričnim krajevima;
- Debljinu stijenki posude - kada je umnožak PS i volumena (V) manji ili jednak  $3000\text{ bar} * L$ , debljina stijenki određuje se prema proračunskoj ili eksperimentalnoj metodi, no ako je umnožak PS i V veći od  $3000\text{ bar} * L$  ili kad je najviša radna temperatura veća od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  određivanje debljine stijenki se obavezno određuje prema proračunskoj metodi. Minimalna izvedena debljina stijenki iznosi: 2 mm za čelične posude i 3 mm za posude od aluminijske ili aluminijevske legure.

Spomenute dvije metode određivanja debljine stijenke tlačne posude imaju određena pravila, tako da proračunsku metodu vrijedi, da se minimalna debljina dijelova posude pod tlakom računa se na temelju dopuštenih naprezanja:

- Proračunski tlak mora biti jednak ili veći od PS;
- Kad cilindrični dio posude ima jedan ili više uzdužnih zavara koji se ne izvode automatskim postupcima zavarivanja, proračunski određena debljina stijenke mora se pomnožiti s koeficijentom 1,15;
- Dopušteno glavno membransko naprezanje ne smije prelaziti:  $0,6 R_{eT}$  ili  $0,3 R_m$ .

Pri tome proizvođač posude mora uzeti najmanje vrijednosti  $R_{eT}$  i  $R_m$  za izabrani materijal, garantirane od strane proizvođača materijala, kad određuje dozvoljena naprezanja.

Dok za eksperimentalnu metodu određivanja debljine tlačnih posuda vrijedi da se može odrediti na osnovi tlačne probe na temperaturi okoline, kod koje se posuda izlaže tlaku koji je najmanje pet puta veći od najvećeg radnog tlaka. Ostatna deformacija kružnosti cilindričnog dijela posude ne smije biti veća od 1 %.

Kada se pravilnom analizom odrede svi potrebni parametri koje je potrebno uzet u obzir, sužit će se i izbor materijala koje možemo koristiti prilikom izrade ovakve opreme. Tu je potrebno slijediti pravila danih u Pravilniku o tlačnoj opremi kao i u Pravilniku o jednostavnim tlačnim posudama.

## 4. ODABIR MATERIJALA ZA IZRADU TLAČNE OPREME

Kao što je rečeno u uvodu prilikom konstruiranja i proizvodnje tlačne opreme nužan je pravilan odabir materijala, zbog visokih zahtjeva na sigurnost i efikasnost opreme. Uz dobra mehanička i kemijska svojstva poput: velike tvrdoće i čvrstoće, dobre žilavosti i plastičnosti, otpornost na povišene temperature i otpornosti na umor materijala, mora se paziti da materijal izdrži čitavi životni vijek određene tlačne opreme ako nisu predviđene zamjene pojedinih dijelova.

Prema pravilniku o tlačnoj opremi materijal koji koristimo mora biti takav da se osigura sigurnosti, dugotrajnost i otpornost opreme na različite radne uvjete. Posebni naglasak je na tehničke zahtjeve, kemijsku i mehaničku otpornost materijala te postupke osiguranja kvalitete. Pravilnik o tlačnoj opremi nas navodi na lakše razumijevanje na koji način pravilan odabir i certificiranje materijala, doprinosi sigurnosti tlačne opreme u njenom predviđenom vijeku trajanja. [1]

### 4.1. Zahtjevi za materijale pri izradi tlačne opreme [1]

Materijali za dijelove pod tlakom moraju zadovoljiti niz tehničkih i sigurnosnih zahtjeva:

- Materijali za izradu tlačne opreme moraju posjedovati adekvatna svojstva plastičnosti i žilavosti za sve predvidive radne uvjete i uvjete ispitivanja. Ako se koristi materijal sklon krhkom lomu, moraju se poduzeti dodatne mjere kako bi se spriječile posljedice loma;
- Materijali moraju biti otporni na kemijske utjecaje fluida koji se nalaze u opremi te moraju održavati potrebna kemijska i fizikalna svojstva kroz cijeli vijek trajanja opreme;
- Moraju biti stabilni na starenje, to je ključan zahtjev za osiguravanje dugotrajnosti, učinkovitosti i sigurnosti tlačne opreme;
- Materijali moraju biti pogodni za sve predviđene postupke obrade, uključujući zavarivanje, strojnu obradu i termičku obradu;
- Pri odabiru materijala potrebno je spriječiti negativne učinke koji mogu nastati spajanjem različitih materijala.

#### 4.2. Obaveze proizvođača tlačne opreme [1]

Osim slijeđenja raznih tehničkih i sigurnosti zahtjeva pri odabiru materijala, proizvođač tlačne opreme je dužan:

- Definirati osnovna svojstva materijala i načine obrade koji su potrebni za proračune konstruiranja;
- Dokumentirati specifikacije materijala u obliku tehničke dokumentacije tako da slijedi postupke korištenja materijala koji zadovoljavaju usklađene norme, korištenjem materijala odobrenog od strane europskih tijela ili posebno odobrenih materijala;
- Da za tlačnu opremu u višim kategorijama III. i IV. ocjenu materijala provodi prijavljeno tijelo za ocjenjivanje sukladnosti.

#### 4.3. Osiguravanje sukladnosti materijala [1]

Proizvođač mora osigurati da svi materijali zadovoljavaju određene zahtjeve specifikacija. Dokumentaciju koju proizvođač materijala mora izdati uključuje certifikat o kontroli materijala za sve glavne dijelove pod tlakom kategorija II, III i IV. Ako proizvođač materijala posjeduje sustav osiguranja kvalitete potvrđen od strane kompetentnog tijela unutar EU, izdani certifikat smatra se dokazom sukladnosti.

Sva pravila zahtjevi i upozorenja izvučenih iz Pravilnika o tlačnoj opremi vezanih uz odabir materijala pri izradi tlačne opreme, vrijede za izradu cjevovoda pod visokim tlakom, ali i tlačnih posuda, uz dodatak zahtjeva i pravila koje izvlačimo iz pravilnika o jednostavnim tlačnim posudama.

#### 4.4. Materijal za tlačne posude prema Pravilniku o jednostavnim tlačnim posudama [5]

Ovaj Pravilnik primjenjuje se na jednostavne tlačne posude proizvedene u serijama, koje posjeduju sljedeće značajke:



- Posude su izrađene u zavarenoj izvedbi, namijenjene su za zrak i dušik pod unutarnjim predtlakom većim od 0,5 bara te nisu predviđene za loženje;
- Dijelovi i sklopovi koji pridonose čvrstoći posude pod tlakom izrađeni su od nelegiranog kvalitetnog čelika i nelegiranog aluminija ili aluminijevih legura koje se ne stvrđavaju s vremenom;
- Kada se konstrukcija posude sastoji od cilindričnog dijela kružnog presjeka zatvorenog vanjskim ispučnim i/ili ravnim podnicama koje su postavljene oko iste osi kao i cilindrični dio, ili dvije ispučene podnice postavljene oko iste osi;
- Najveći radni tlak posude ne smije prelaziti 30 bar, dok umnožak tlaka i volumena ( $PS \cdot V$ ) ne smije biti veći od 10 000 bar \* L;
- Najniža radna temperatura ne smije biti niža od -50 °C, a najviša radna temperatura ne smije prelaziti 300 °C za čelične posude, odnosno 100 °C za aluminijske posude ili posude od aluminijevih legura.

S druge strane ovaj pravilnik se ne primjenjuje na:

- Posude posebno dizajnirane za nuklearna postrojenja, čije oštećenje može prouzročiti radioaktivno zračenje;
- Posude namijenjene za brodove i zrakoplove te njihove pogonske sustave;
- Protupožarne aparate.

Materijali za takve posude se biraju prema namjeni posuda i ovisno o vrsti same posude, tako posude najčešće mogu biti čelične ili aluminijske.

Čelične posude izrađene su od nelegiranih kvalitetnih čelika koji moraju zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- Moraju biti umireni i dostavljeni nakon postupka normalizacije ili u istovjetnom stanju;
- Sadržaj ugljika u proizvodu manji je od 0,25 %, a sadržaj sumpora i fosfora manji je od 0,05 % za svaki element;

Svaki proizvod ima sljedeća mehanička svojstva:

- Najveću vlačnu čvrstoću  $R_{m, \max}$  manju od 580 N/mm<sup>2</sup>;

Istezanje nakon loma iznosi:

- Za uzorke uzete usporedno sa smjerom valjanja:
  - Ako je debljina  $\geq 3$  mm, onda je  $A \geq 22$  %
  - Ako je debljina  $< 3$  mm, onda je  $A_{80 \text{ mm}} \geq 17$  %
- Za uzorke uzete okomito na smjer valjanja:
  - Ako je debljina  $\geq 3$  mm, onda je  $A \geq 17$  %
  - Ako je debljina  $< 3$  mm, onda je  $A_{80 \text{ mm}} \geq 15$  %

Udarni rad loma po površini poprečnog presjeka za tri uzdužna ispitna uzorka pri najvišoj radnoj temperaturi nije manja od  $35 \text{ J/cm}^2$ . Samo jedan od tri rezultata smije biti manji od  $35 \text{ J/cm}^2$ , pri čemu je najmanja vrijednost  $25 \text{ J/cm}^2$ . Za čelike koji se namjeravaju koristiti za proizvodnju posuda gdje je najniža radna temperatura manja od  $-10$  °C, a debljina stijenke posude veća od 5 mm, to se svojstvo mora provjeriti.

Dok su aluminijske posude napravljene od nelegiranog aluminija koji sadrži najmanje 99,5 % aluminija i legure koje pokazuju dovoljnu otpornost na interkristalnu koroziju pri najvišoj radnoj temperaturi.

Osim toga ovi materijali moraju zadovoljavati sljedeće zahtjeve i posjedovati određena mehanička svojstva poput:

- Moraju biti isporučeni u žarenom stanju;
- Imati najveću vlačnu čvrstoću  $R_{m, \text{max}}$  manju od  $350 \text{ N/mm}^2$ ;
- Da produljenje nakon loma iznosi:
  - $A \geq 16$  % ako je ispitni uzorak uzet usporedno sa smjerom valjanja;
  - $A \geq 14$  % ako je ispitni uzorak uzet okomito na smjer valjanja.

#### 4.5. Zavarljivost materijala

Budući da je najčešća tehnologija spajanja i proizvodnje tlačne opreme zavarivanje, zavarljivost odabranog materijala predstavlja jedan od ključnih zahtjeva koji mora ispunjavati svaki materijal korišten za proizvodnju tlačne opreme.

Komponenta izrađena od metalnih materijala smatra se zavarljivom određenim postupkom ako se primjenom odgovarajuće procedure može postići kontinuitet metalnog materijala. Istodobno, zavareni spoj mora zadovoljiti kriterije mehaničkih i metalurških svojstava, kao i njihove učinke na konstrukciju. [6]

Zavarljivost ovisi o tri ključna faktora:

1. Materijalu
2. Konstrukciji (oblikovanju)
3. Tehnologiji (izradi) [6]

Metalurška zavarljivost čelika često se izražava ekvivalentom ugljika, dobivenim prema određenim formulama. Kemijski elementi u sastavu čelika u različitim stupnjevima utječu na njegov ekvivalent ugljika. [7]

Za izračunavanje ekvivalenta ugljika (CE) u procesu zavarivanja, najčešće se primjenjuju formule koje su definirane od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) i Američkog društva za zavarivanje (AWS). Međutim, odabir odgovarajuće formule ovisi o specifičnostima osnovnog materijala, vrsti postupka zavarivanja i proizvodnim zahtjevima. [8]

Prema normi HRN EN 1011-2:2002/A1:2008, koja regulira zavarivanje čelika, omogućuje se primjena različitih metoda za izračunavanje ekvivalenta ugljika, a izbor metode treba biti usklađen s vrstom osnovnog materijala i zahtjevima projekta. [3]

ASW formula glasi:

$$C_e = C + \frac{P}{2} + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr+V}{5} + \frac{Ni}{1} \quad (4.1)$$

Dok IIW formula kojom se koristimo najčešće glasi:

$$C_{e_{iiw}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu+Ni}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \quad (4.2)$$

Gdje su:

- $C_e$  = ekvivalent ugljika

- C = maseni udio ugljika
- P = maseni udio fosfora
- Mn = maseni udio mangana
- Mo = maseni udio molibdena
- Cr = maseni udio kroma
- V = maseni udio vanadija
- Ni = maseni udio nikala
- Cu = maseni udio bakra

Istraživanja su pokazala i kako i ekvivalent ugljika utječe na zavarljivost čelika, ovisnost o tome prikazana je u tablici 2.

**Tablica 2. Ovisnost vrijednosti ekvivalenta ugljika i zavarljivosti materijala [8]**

| Vrijednost ekvivalenta ugljika | Zavarljivost materijala |
|--------------------------------|-------------------------|
| Do 0,35                        | Izvrstna                |
| 0,36 – 0,40                    | Vrlo dobra              |
| 0,41 – 0,45                    | Dobra                   |
| 0,46 – 0,50                    | Zadovoljavajuća         |
| 0,51 i više                    | Slaba                   |

Iz tablice 2 vidljivo je, da zavarivanje legiranih čelika s ekvivalentom ugljika iznad 0,40 je otežano i nije ih baš najpraktičnije koristiti prilikom izrade tlačne opreme postupkom zavarivanja. Prema smjernicama AWS-a, ekvivalent ugljika veći od 0,40 nosi rizik od nastanka pukotina:

- U zoni utjecaja topline;
- Na rubovima rezanima plamenom;
- Na zavarenim spojevima. [8]

Kod mikrolegiranih čelika, osim ekvivalenta ugljika, potrebno je provesti dodatna ispitivanja radi ocjene zavarljivosti. Naime, pri jednakoj vrijednosti ekvivalenta ugljika, razlike u debljini materijala i sadržaju vodika u zavaru mogu uzrokovati varijacije u osjetljivosti na hladne pukotine. Stoga je nužno procijeniti i sljedeće čimbenike:

- Sklonost nastanku toplih i hladnih pukotina;
- Osjetljivost zavora i zone utjecaja topline na krhki lom;
- Lamelarno trganje;
- Sklonost pukotinama uslijed žarenja za smanjenje zaostalih naprežanja. [7]

#### 4.6. Noviji materijali pri izradi tlačnih posuda i cjevovoda

Iako prevladavaju čelične i aluminijske tlačne posude i čelični cjevovodi, razvojem raznih tehnologija i novih materijala, inženjeri su u stalnoj potrazi za materijalima koji će im riješiti onaj glavni problem kod tlačne opreme, a to je korozija. Zbog toga se sve više pokušava integrirati kompozitne materijale obično u kombinacijom s čelikom u proizvodnju opreme pod tlakom. Kompozitni materijali u odnosu na klasične konstrukcijske čelike imaju, veću otpornost prema koroziji, a pošto njena mehanička i kemijska ovise o svojstvima matrice i ojačala, te njihovom međusobnom rasporedu, obliku i jakosti veza između njih, raznovrsnost svojstva kompozitnih materijala je praktički neograničena. Ovdje je cilj dobiti kompozit što veće čvrstoće i tvrdoće, plastičnosti i žilavosti, te što veću otpornost na koroziju i krhki lom, stoga ćemo upravo takve kompozitne materijale i koristiti.

Općenito tlačne posude mogu se klasificirati u 4 kategorije na temelju njihovog konstruiranja:

1. TIP I: U tlačnim spremnicima tipa I, cijeli cilindar izrađen je od čelika. Metalni limovi oblikuju se u cilindar s pomoću zavarivanja. O takvoj posudi ćemo govoriti i u eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada te se ona i danas najčešće primjenjuje;
2. TIP II: Kod tlačnih spremnika tipa II, dodatni sloj kompozitnog materijala omotava se oko unutarnjeg čeličnog spremnika radi smanjenja utjecaja korozije i ostalih trošenja, a opterećenje dijele kompozit i čelik;
3. TIP III: U spremnicima tipa III koristi se metalna obloga, poput aluminijska, za zadržavanje LPG-a, dok je opterećenje preuzeto kompozitnim materijalom omotanom oko obloge;

4. TIP IV: U spremnicima tipa IV, metal je potpuno uklonjen iz strukture. Plastika, poput HDPE-a ili PET-a, koristi se za izradu obloge, dok kompozit preuzima sav teret. [9]

#### **4.6.1. Kompozitne tlačne posude**

Kompozitne materijale kao zamjenu za konstrukcijske čelike visokih čvrstoća koristimo pri konstrukciji tlačnih posuda, u situacijama koje zahtijevaju malu masu i veliku korozivsku otpornost, poput svemirske industrije i industrije nafte i plina. Tada se mogu koristiti kompozitni materijali poput FRP-a (kompozitni materijal ojačan vlaknima), koji se sastoji od epoksidne smole i staklenih vlakana s odgovarajućim premazima. Na temelju analize provedene korištenjem ANSYS softverskog paketa, uspoređeni su čelik i kompozitni materijal FRP, u pogledu naprezanja i mase. Utvrđeno je da je maksimalno naprezanje u FRP kompozitu bilo niže od dopuštenog naprezanja za FRP materijal, a masa je smanjena za čak 75 %, uz istovremeno eliminiranje problema korozije čelika. [10]

Također je danas popularna izrada višeslojnih tlačnih posuda koje se proizvode namotavanjem niza različitih slojeva oko središnje cijevi. To nam daje mogućnost odabira različitih materijala za različite slojeve prema funkcionalnosti kako nam odgovara, tako onda unutarnji sloj može biti izrađen od nekog materijala otpornog na koroziju, dok vanjski slojevi da budu što veće čvrstoće. Proizvodnja takve vrste tlačnih posuda također doprinosi i smanjenju ukupne težine posude, te ravnomjerniju distribuciju naprezanja, stoga su takve posude prikladne za uvijete visoke temperature i tlaka. [10]

Izrada takve kompozitne LPG (tlačne posude za ukapljeni naftni plin) tlačne posude započinje pravilnim odabirom materijala, uključujući materijal obloge, vlakna i matricu smole za adhezijsko vezivanje. Sastoji se od HDPE obloge koja označava polietilen visoke čvrstoće, te omotana staklena vlakna kroz proces namotavanja filamenta. Proces namotavanja filamenta: se sastoji od toga da staklena vlakna prolaze kroz rezervoar sa smolom kako bi se ravnomjerno obložila ljepljivom matricom, te se zatim staklena vlakna namotavaju na oblogu od HDPE-a koji je postavljen na rotirajući stol. Prilikom namotavanja mora se paziti na kut namotavanja da se

postigne optimalna kombinacija čvrstoće i otpornosti na tlak, a istraživanja su pokazala da optimalni kut namatanja iznosi oko 55°. [9]



**Slika 7. Kompozitna LPG tlačna posuda [9]**

Zatim se prelazi na proces očvršćivanja, a to provodi tako da se dobiveni kompozitni cilindar drži u peći 120 minuta na 120 °C. Očvršćivanjem se slojevi kompozita čvrsto povezuju, osiguravajući stabilnu strukturu, čvrstoću i otpornost na trošenje i koroziju. Za kraj dobivena tlačna posuda mora se i ispitati ispravnom tlačnom probom kao što je hidrostatsko testiranje, time se provjerava ima li propuštanja u slojevima kompozita ili na otvoru ventila i hoće li tlačna oprema izdržati radni tlak, koji je za ovaj slučaj bio 20 bar, dok je ispitani tlak bio 30 bar, kojega je posuda izdržala bez ikakvih strukturnih promjena, te se dokazalo da se tlačne posude otporne i na ovako visoke tlakove mogu izraditi bez upotrebe metalnih komponenti. [9]



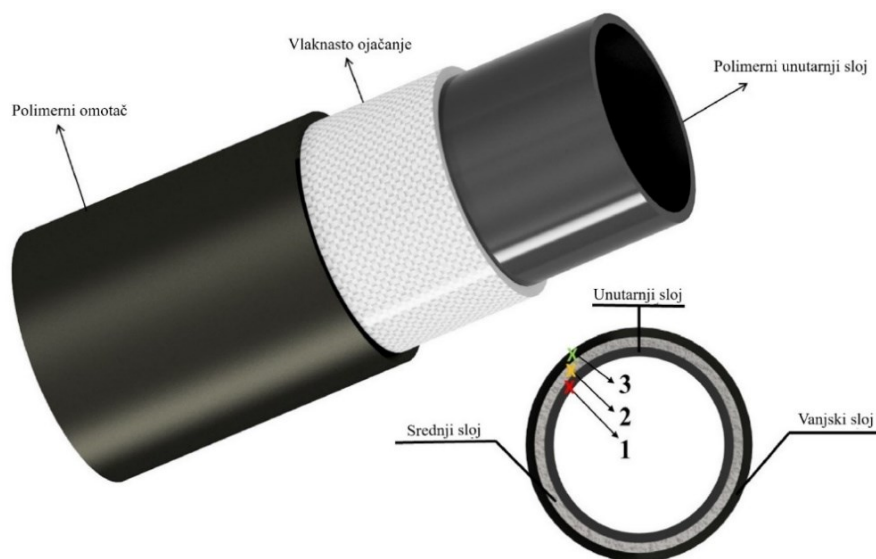
**Slika 8. Hidrostatsko ispitivanje kompozitnog LPG tlačnog spremnika na 30 bar [9]**

#### 4.6.2. Kompozitni cjevovodi pod visokim tlakovima [11]

Kao što je i rečeno, s obzirom na izuzetna svojstva koja posjeduje te izvrsnog omjera čvrstoće i mase, kao i otpornosti na koroziju, FRP kompoziti predstavljaju izuzetno pogodan materijal za primjenu u industriji nafte i plina. Međutim, još uvijek postoje neka implementacijske i tehničke poteškoće koje je potrebno riješiti prije nego što inženjerske tvrtke, uključujući i one u proizvodnji cjevovoda, široko usvoje FRP kompozite za tu svrhu.

Unatoč tome u industriji nafte i plina sve se više preferira korištenje RTP (ojačane termoplastične cijevi), za različite situacije na cjevovodima, te se obično koriste kada se u cjevovodima nalazi medij s izraženijom korozivnosti. RTP cijevi posjeduju svojstva visoke čvrstoće, a male mase, te se isto tako dobro ponašaju u uvjetima, velike korozivne aktivnosti, visokih temperatura i intenzivnih naprezanja, upravo zbog takvih svojstva RTP se počeo sve više koristiti u izradi cjevovoda visokih tlakova, temperature i korozivne aktivnosti.

RTP su izrađeni od kontinuirane polimerne matrice (izrađene od termo-otvrdnjavajućih materijala poput poliesterske ili epoksi smole) i ojačani odgovarajućim vlaknima. Smole i vlakna atraktivni su zbog svoje male težine, a materijali izrađeni od njih imaju visoku kemijsku otpornost, što ih čini pogodnima za primjenu u agresivnim okruženjima, poput raznih tlačnih spremnika. Tipična konstrukcija RTP-a uključuje unutarnji sloj podloge, srednji ojačani sloj i vanjski zaštitni sloj.



Slika 9. Konstrukcija ojačane termoplastične cijevi [11]



Osim toga, zahvaljujući različitim kombinacijama smola i ojačavajućih vlakana, ovi materijali posjeduju izvrsnu mehaničku otpornost. Upravo zbog mnogobrojnih prednosti, primjena RTP cijevi bilježi značajan rast na međunarodnoj razini, posebice u industriji nafte i plina, gdje troškovi održavanja ovih cijevi iznose 40-50 % manje u usporedbi s konvencionalnim čeličnim cjevovodima.

Istraživanje je potvrdilo da kompozitni materijali posjeduju sposobnost podnošenja visokih tlakova, uz istovremenu visoku otpornost na koroziju, pouzdanost, dugotrajnost i dokazanu učinkovitost prilikom instalacije. Takav pristup otvara mnogobrojne mogućnosti za primjenu ovih materijala u budućnosti, posebice u industriji nafte i plina.

Primjena RTP cjevovoda mogla bi:

- Unaprijediti transportne cjevovodne linije za kopnene bušotine nafte i plina. Zamjenom postojećih linija RTP cjevovodima, smanjili bi se ukupni troškovi održavanja, budući da bi eliminacija korozije uzrokovane toksičnim spojevima poput H<sub>2</sub>S i CO<sub>2</sub>, rezultirala duljim vijekom trajanja cjevovoda;
- U potpunosti zamijeniti osjetljivije bakrene cijevi u rafinerijama, s obzirom na višu otpornost RTP materijala na koroziju te njihovu sposobnost podnošenja visokih tlakova i temperature;
- Osim otpornosti na koroziju, RTP cjevovodi zbog karakteristika poput podnošenja visokih temperatura i tlakova, prilagođavaju se i najzahtjevnijim uvjetima okoliša i radnih uvjeta.

Ovaj dio rada pokazao je kako vlaknima ojačani polimeri (FRP) i ostali kompozitni materijali, predstavljaju kvalitetnu alternativu tradicionalnim materijalima za tlačne posude i cjevovode. Njihova otpornost na koroziju, visoke temperature i tlakove, uz značajno niže troškove održavanja, čini ih idealnim rješenjem za buduće projekte.

#### **4.6.3. Zaštita čeličnih cjevovoda kompozitnim materijalima [12]**

Razvoj kompozitnih materijala, poput stakloplastike, bazaltnih vlakana ojačanih polimerima i plastike s ugljičnim punilima, u posljednjih nekoliko desetljeća otvorio je nove mogućnosti u proizvodnji višeslojnih konstrukcija, uključujući i cjevovode. Posebno značajan napredak ostvaren

je korištenjem metode namotavanja, koja omogućuje izradu konstrukcija koje se sastoje od čeličnog cilindra ojačanog višeslojnim kompozitnim materijalima poput polietilena, keramike ili stakloplastike, kako bi se riješio onaj glavni problem, a to je korozija čelika.

Stakloplastika se ističe među kompozitnim materijalima zahvaljujući izvrsnim mehaničkim i kemijskim svojstvima, uključujući visoku tlačnu čvrstoću, otpornost na koroziju i malu masu. U usporedbi s čelikom, stakloplastika je tri puta lakša, dok je njezina specifična čvrstoća 3,5 - 4 puta veća. Ta svojstva omogućuju široku primjenu stakloplastike u ojačanju čeličnih cjevovoda, a posebno u uvjetima agresivnih podzemnih voda.

Ojačanje stakloplastičnom trakom omogućuje oblikovanje kontinuiranih zaštitnih prevlaka, čime se štiti cjevovod od unutarnjih i vanjskih negativnih faktora, poput korozije. Osim zaštite, stakloplastika značajno povećava čvrstoću cjevovoda i produžuje njegov vijek trajanja za 2 do 2,5 puta. Ovo je osobito važno kod cjevovoda izloženih visokim tlakovima i agresivnim okolišnim uvjetima.

Kombinacija čelika i stakloplastike, kao anizotropnih materijala, inhibira korozivne procese na površini cjevovoda, čime se dodatno osigurava dugoročna pouzdanost sustava. Primjena stakloplastičnog ojačanja predstavlja učinkovito rješenje za produženje trajnosti cjevovoda i smanjenje troškova održavanja.

#### *4.6.3.1. Pristupi i metode zaštite cjevovoda [13]*

Zaštita čeličnih cjevovoda od korozije ključna je za očuvanje dugotrajnosti infrastrukturnih sustava. Za primjer je uzet pogon tvrtke FEROMIHIN, gdje se koriste napredna rješenja za očuvanje cjevovoda, uključujući suvremene premaze, zaštitne trake, mreže za zaštitu poput AEGIS-a Rockshielda i druge metode zaštite cjevovodnih sustava.

Neki o ključnih pristupa pri zaštiti čeličnih cjevovoda su:

Premazi za zaštitu - cjevovodi su premazani slojevima koji osiguravaju otpornost na vanjske čimbenike, uključujući korozivne kemikalije, abrazivne materijale, visoke temperature i tlakove.

Premazi se biraju prema specifičnim zahtjevima projekta, a najčešće korišteni su:

Tvornički premazi poput:

- Polietilena (PE) – koji pruža izvrsnu otpornost na koroziju i mehanička oštećenja.
- Polipropilen (PP) – idealan za visoke temperature i zahtjevne uvjete okoliša.
- Fuzijski vezan epoksid (FBE) – osigurava čvrstu vezu s površinom cijevi te visoku otpornost na kemijske utjecaje.

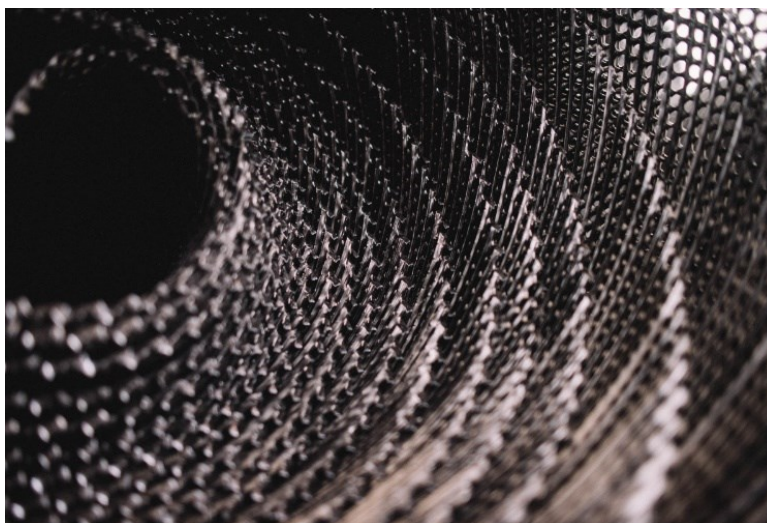
Konvencionalni premazi kao što su:

- Epoksidni premazi – idealni za unutarnju zaštitu od korozije;
- Poliuretanski premazi – otporni na mehanička oštećenja i kemikalije.

Zaštitne trake koje se koriste za dodatnu zaštitu spojeva i oštećenih dijelova premaza, a izrađene su od:

- Poliizobutena (PIB)
- Butila
- Petrolatuma

Sve popularnija zaštita cjevovoda je fizička zaštita trodimenzionalnim plastičnim mrežama u obliku dijamanta, poznatija kao AEGIS Rockshield.



**Slika 10. Izgled AEGIS Rockshield mreže [13]**

Takav sustav zaštite osigurava dodatnu zaštitu cjevovoda u zahtjevnim uvjetima, osobito u kamenitim područjima, jer posjeduje karakteristike kao što su:

- Kemijska inertnost, koja omogućuje kompatibilnost s različitim premazima;
- Otpornost na truljenje i koroziju;
- Struktura otvorene mreže koja olakšava protok vode i sprječava nakupljanje vlage.

Isto tako svakodnevno se koriste metode zaštite poput:

- Katodna zaštita - način zaštite koja se koristi za sprječavanje elektrokemijske korozije cjevovoda. Sustav uključuje primjenu žrtvenih anoda ili struje koja neutralizira korozivne procese;
- Inhibitori korozije - dodavanjem inhibitora korozije u transportirane medije smanjuje se mogućnost unutarnje korozije, osobito kod transporta kemijski agresivnih fluida;
- Izolacija - toplinska izolacija osigurava stabilnost temperature i smanjuje rizik od kondenzacije, što dodatno doprinosi zaštiti od korozije.

Uz sve navedene metode zaštite, ključna komponenta u zaštiti cjevovoda je precizno projektiranje i pravilna instalacija. Nedostaci u izvedbi, poput nepravilnog nanošenja premaza ili neujednačenosti u zaštiti spojeva, mogu dovesti do nakupljanja vode i povećanja rizika od korozije.

Isto tako i redovita inspekcija i održavanje, jer redovite inspekcije omogućuju rano otkrivanje problema, poput oštećenja premaza ili početnih znakova korozije, čime se sprječavaju veći kvarovi i produžuje vijek trajanja cjevovoda.

Implementacija svih navedenih metoda zaštite, te pravilno konstruiranje, inspekcija i održavanja, osiguravaju učinkovitu zaštitu čeličnih cjevovoda, čime se produljuje njihov vijek trajanja i minimiziraju troškovi održavanja. Uz sve to, ključan je i ispravan izbor tehnologije zavarivanja koji se koristi prilikom spajanja dijelova tlačne opreme.

## 5. ZAVARIVANJE

Zavarivanje je tehnološki postupak trajnog spajanja dva ili više materijala, najčešće metala i legura. Procesom zavarivanja dolazi do stapanja osnovnog i često dodatnog materijala u homogenu cjelinu, stvarajući spojeve koji zadovoljavaju mehaničke, termalne i kemijske zahtjeve specifične primjene. Zavarivanje se široko koristi u različitim industrijama, uključujući građevinarstvo, strojarstvo, brodogradnju, automobilski sektor, ali i proizvodnju tlačne opreme, gdje su zahtjevi za nepropusnošću i otpornosti na visoke tlakove i temperature ključni. [14]

### 5.1. Zavarivanje tlačne opreme

Zavarivanje, kao ključna tehnologija u proizvodnji čelične i aluminijske tlačne opreme, zahtijeva posebnu pozornost i primjenu najnovijih tehnoloških rješenja kako bi se osigurala visoka kvaliteta zavara i pouzdanost opreme. Upravo to čini zavarivanje temeljem moderne proizvodnje tlačne opreme, omogućujući sigurnost i učinkovitost u industrijskim procesima.

Osim svih navedenih normi i niza pravila koje su navedene u 2.3 ovog rada prilikom zavarivanja tlačne opreme kako bi se osigurala kvaliteta i sigurnost zavarenih spojeva, potrebno je slijediti još neka određena pravila i propise koja se odnose na pripremu spojeva odabir tehnologije i odgovornosti proizvođača.

Prema Pravilniku o tlačnoj opremi:

- Priprema dijelova za zavarivanje, (npr. razna oblikovanja i skošenja) ne smije uzrokovati oštećenja, pukotine ili promjene u mehaničkim svojstvima koje bi mogle štetiti sigurnosti tlačne opreme;
- Nerastavljivi spojevi i područja oko njih ne smiju imati nikakva oštećenja na površini ili unutrašnjosti koja bi štetila sigurnosti opreme. Svojstva nerastavljivih spojeva moraju odgovarati minimalnim svojstvima utvrđenima za materijale koji se spajaju osim ako u proračunu nisu posebno uzete u obzir druge odgovarajuće vrijednosti tih svojstava. [1]

Isto tako površina koja će se zavarivati mora biti u potpunosti čista te ju je potrebno potpuno očistiti od hrđe, oksida, masnoća, boja i sličnih supstancija te ne smije sadržavati prskotine, pukotine i slične nedostatke koji bi imali štetan utjecaj na kvalitetu zavarivanja. [14]

Dok najčešće korištene tehnologije za izradu tlačne opreme, zbog svojih povoljnih karakteristika su: TIG i REL postupci zavarivanja, a isto tako i njihova kombinacija TIG + REL, stoga će u nastavku ti postupci zavarivanja biti objašnjeni. [15]

## **5.2. REL postupak zavarivanja**

REL, također poznat kao MMA (Manual Metal Arc) ili SMAW (Shielded Metal Arc Welding) zavarivanje je postupak zavarivanja u kojem se električni luk stvara između obložene elektrode i osnovnog materijala, pri čemu se toplinom luka tali elektroda i osnovni materijal, formirajući spoj. Zaštitu zavara od atmosferskih plinova, osigurava troska i zaštitni plinovi nastali izgaranjem obloge elektrode. REL je ekonomičniji u usporedbi s drugim tehnikama zavarivanja, te je njegova primjena vrlo rasprostranjena, a najčešće se koristi pri zavarivanju čeličnih konstrukcija, brodogradnji i izradi tlačne opreme, najčešće cjevovoda. [14]

### **5.2.1. Parametri zavarivanja pri REL postupka zavarivanja**

Parametri zavarivanja kod REL postupka su: polaritet (vrsta) struje, jačina struje i brzina zavarivanja.

- Polaritet struje se određuje prema vrsti obloge, tako ovisno koju vrstu obložene elektrode koristimo polaritet će biti drugačiji;
- Jačina struje zavarivanja okvirno se određuje prema pravilu, 1 mm promjera elektrode opterećuje se s 30 do 40 A;
- Brzina zavarivanja je rezultat prilagodbe parametrima postupka zavarivanja, materijala i njegovoj debljini i zahtjevima kvalitete zavara. Ručno upravljanje brzinom zavarivanja koje je i najčešće u REL postupku ovisi o vještinama i preciznosti zavarivača. Iskusni zavarivači mogu prilagoditi brzinu na temelju vizualne procjene i karakteristike zavara. [14]

Brzina zavarivanja općenito označava brzinu kojom elektroda prelazi duž zavara, a povećanjem brzine uz održavanje jakosti struje, smanjuje se širina zavarenog spoja. Zbog toga je potrebno naći optimalnu brzinu zavarivanja pri kojoj dubina prodiranja zavara doseže maksimum, jer će daljnje povećanje brzine smanjiti prodornost. [16]

Jakost struje zavarivanja je ključan parametar koji značajno utječe na dubinu topljenja, prodornost i brzinu dodavanja materijala. Količina topline generirane tijekom zavarivanja ovisi o jakosti struje koja odgovara veličini elektrode. Stoga je pravilna jakost struje nužna za postizanje kvalitetnog zavarenog spoja. [16]

Parametri zavarivanja značajno utječu na čvrstoću i kvalitetu zavarenog spoja. Parametri poput struje i brzine zavarivanja, izravno utječu na mehanička svojstva, kao što su tvrdoća i vlačna čvrstoća zavarenog spoja. [16]

Općenito, povećanje struje zavarivanja povećava tvrdoću, ali smanjuje vlačnu čvrstoću. S druge strane, povećanje brzine zavarivanja dovodi do povećanja tvrdoće i vlačne čvrstoće spoja. [16]

### **5.2.2. Karakteristike REL postupka [14]**

Prednosti REL postupka zavarivanja su:

- Široko područje primjene;
- Jeftina i jednostavna oprema;
- Zavarivanje u svim položajima;
- Zavarivanje u radionici i na terenu;
- Zavarivanje svih debljina;
- Zavarivanje svih materijala;
- Jednostavno određivanje parametara.

Nedostaci REL postupka zavarivanja su:

- Visok sadržaj para i plinova, te je potrebna dobra ventilacija i odsis;
- Loša iskoristivost dodatnog materijala (gubici do 30%);
- Štrecanje, troska;
- Potrebno kontrolirano rukovanje elektrodama;

- Utjecaj ljudskog faktora - zavarivača;
- Slaba mogućnost automatizacije.

### 5.2.3. Vrste obloga elektrode kod REL postupka zavarivanja [14]

Vrste obloga elektrode za REL zavarivanje su:

Bazična elektroda:

- Osigurava dobra mehanička svojstva, posebno žilavost;
- Obloga bazične elektrode intenzivno upija vlagu, te je neophodno sušenje prije uporabe (tipično 2 do 3 sata na 200 do 400°C, ovisno o uputama proizvođača). Bazične elektrode se također moraju prije potrošnje čuvati u elektrootporno grijanim tobovcima;
- Zavareni spoj je homogen i čist od štetnih plinova;
- Stabilnost električnog luka je snižena;
- Bazična elektroda zahtijeva spajanje na pozitivan pol i zavarivanje s kraćim električnim lukom približne duljine 0,5 promjera elektrode;
- Troska kod bazične elektrode se teže čisti i zavar je više ispučen i za njenu upotrebu potrebna je dobra vještina zavarivača.

Rutilna elektroda:

- Nije zahtjevnija za rukovanje kao bazična elektroda, te zavar ima bolju estetiku i stabilnost električnog luka je visoka;
- Može se spojiti na negativan pol ili na izmjeničnu struju;
- Moguća je primjena u svim položajima zavarivanja;
- Duljina luka je približno duljine promjera elektrode.

Celulozna elektroda:

- Osiguravaju dobru penetraciju i visoku brzinu zavarivanja;
- Obloga je organskog porijekla daje visok sadržaj vodika u zavaru;
- Koristi se prvenstveno za zavarivanje cjevovoda, „fallnaht” tehnikom, odnosno silaznim zavarivanjem;
- Mogućnost spajanja na pozitivan i negativan polaritet.



#### 5.2.4. Pogreške kod REL postupka zavarivanja [14]

Najčešće pogreške kod REL zavarivanja su poroznost, nedovoljna penetracija i naljepljivanje, uključci troske i loša geometrija zavara

Poroznost nastaje zbog raznih faktora poput:

- Nepravilna tehnika rada;
- Neodgovarajuća duljina električnog luka;
- Nepravilno prekidanje i nastavljanje zavara;
- Vlažna obloga elektrode ili strujanje zraka.

Nedovoljna penetracija i naljepljivanje nastaje zbog:

- Prebrzog vođenje elektrode;
- Premale struje;
- Puhanja električnog luka.

Uključci troske zbog:

- Lošeg čišćenja između slojeva;
- Nepravilnog ili prejakog njihanja elektrode.

Dok loša geometrija zavara najčešće nastaje zbog neadekvatne tehnike rada i loših parametra zavarivanja kao što su brzina zavarivanja i jakost struje.

S obzirom na svoju izuzetnu ekonomičnost, jednostavnost i univerzalnu primjenu u različitim industrijskim granama, susret s REL postupkom zavarivanja svakodnevna je pojava. Međutim, u današnjem ubrzanom industrijskom okruženju, sve veća potreba za preciznošću i/ili brzinom u zavarivačkim procesima, dovela je do razvoja novih tehnika zavarivanja koje nude poboljšanja u pogledu automatizacije, kvalitete i učinkovitosti, poput TIG, MIG/MAG postupaka zavarivanja.

#### 5.3. TIG postupak zavarivanja

TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanje, također poznato kao GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) zavarivanje, je postupak zavarivanja koji koristi električni luk između nepotrošne volframove elektrode i osnovnog materijala, dok je zaštita zavara osigurana inertnim plinom, obično argonom,

helijem ili njihovom kombinacijom. TIG zavarivanje omogućava izuzetno precizno zavarivanje s minimalnim deformacijama. [14]

Iako su većina drugih postupaka zavarivanja brži i jeftiniji, TIG postupak omogućuje visoko kvalitetne, čiste, uredne i bez troske zavarene spojeve. Upravo zbog svega toga TIG postupak zavarivanja se široko koristi u visokotehnološkim industrijskim primjenama, kao što su nuklearna industrija, zrakoplovstvo, prehrambena industrija, a samim time i u proizvodnji tlačne opreme jer će nam osigurati visoke zahtjeve na kvalitetu i sigurnost spoja. [17]

### **5.3.1. Karakteristike TIG postupka zavarivanja [14]**

Neke općenite prednosti TIG postupka zavarivanja su:

- Primjenjiv za zavarivanje svih materijala;
- Nema rasprskavanja kapljica;
- Zavarivanje u svim položajima;
- Zavarivanje u radionici i na terenu, na terenu je potrebno osigurati povoljne uvjete bez vlage i vjetra;
- Visoka kvaliteta zavara;
- Nema troske, dima i isparavanja;
- Raspon debljina od oko 1 mm do 6 mm;
- Brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka;
- Sam proces može biti ručan, djelomično mehaniziran ili potpuno automatiziran.

Dok neki od nedostataka TIG postupka zavarivanja su:

- Neekonomičnost za veće debljine materijala, zbog male količine nataljenog materijala;
- Otežan rad na otvorenom, zbog vjetra i vlage;
- Zahtjeva kvalitetnu pripremu spoja, točnost geometrije i odmašćivanje podloge;
- Zahtjeva visoku čistoću površine;
- Veliki utjecaj ljudskog faktora, odnosno kvaliteta zavarenog spoja jako ovisi o samoj sposobnosti zavarivača.

### 5.3.2. Karakteristike izvora struje kod TIG postupka zavarivanja

Izvori struje kod TIG postupka zavarivanja se najčešće koriste u obliku istosmjerne struje i to tako da je volframova elektroda spojena na negativni polaritet, tada će elektroda primiti samo 30 % energije zavarivanja, a rezultat će biti dobra provarljivost i uski profil zavara, a dugotrajnost volframove elektrode će biti velika. [17]

U suprotnom slučaju kada je volframova elektroda spojena na pozitivan polaritet, većina topline pada na volframovu elektrodu, zbog čega se elektroda lako može pregrijati i izgorjeti, stoga se takva kombinacija i ne koristi često u praksi. [17]

Jednosmjerne izvore struje koristimo pri zavarivanju materijala kao što su:

- Cr - Ni čelici;
- Nelegirani čelici;
- Titan.

Dok izmjenične izvore struje, odnosno AC/DC izvore koristimo za zavarivanje materijala kao što su aluminij i magnezij i to tako da se s plus polaritetom skidaju površinski slojevi oksida, te se nakon toga prelazi na negativan polaritet s kojim se onda zavaruje sami materijal. Ovakav postupak korištenja izmjeničnog izvora struje je ključan za postizanje dobrih i kvalitetnih zavara na materijalima poput aluminija i magnezija. [14]

### 5.3.3. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja

Odabir odgovarajućeg zaštitnog plina vrši se ovisno o vrsti osnovnog materijala i primjeni:

- Argon je najčešće korišten zaštitni plin koji se koristi prilikom zavarivanja: čelika, nehrđajućih čelika, aluminija, titana;
- Kombinacijom plinova argon i vodik (2 do 5 %), dobiva se reducirajući efekt, bolji izgled zavara, nema površinske oksidacije. Električni luk je uži i ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Nedostatak je opasnost od pojave vodikom uzrokovanih pukotina i poroznost kod aluminija;

- Kombinacijom plinova argon i helij (do 50 %), utjecajem helija postiže se povećanje energije električnog luka, što omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Nedostatak je visoka cijena i poteškoće kod uspostavljanja električnog luka;
- Kombinacija plinova argon i dušik (1 do 3 %) koristi se prilikom zavarivanja duplex i austenitnih čelika, kao i niklovih legura. [14]

Neovisno o odabiru zaštitnog plina, prilikom korištenja zaštitnih plinova, vrlo je bitno da se držimo pravila „pre-flow” i „post-flow”, odnosno „protok zaštitnog plina prije” i „protok zaštitnog plina nakon” zavarivanja. [17]

„Pre-flow” znači, da je prije početka zavarivanja, potrebno plin ispuštati kroz pištolj za TIG zavarivanje kako bi se zaštitila elektroda i područje oko zavara od atmosferskih zagađivača, poput kisika i vlage. To također pomaže u smanjenju mogućnosti stvaranja oksida ili drugih nepoželjnih reakcija u početnoj fazi zavarivanja. [17]

Dok „post-flow” znači da nakon završetka zavarivanja, dotok plina ostaje prisutan još neko vrijeme kako bi zaštitio volframovu elektrodu i zavareni spoj dok se ohladi. To sprječava oksidaciju i štiti zavar od kontaminacije dok se još uvijek hladi na temperaturama koje su dovoljno visoke za reakciju sa zrakom. [17]

#### 5.3.4. Pogreške kod TIG postupka zavarivanja [17]

Zbog kompleksnosti TIG postupka zavarivanja često se javljaju brojni problem, kao što su prekomjerna potrošnja elektrode, neredoviti električni luk, neželjeni uključci volframa i oksida u zavarima, poroznost zavara te neispravno korištenje zaštitnih plinova.

- Prekomjerna potrošnja elektrode:

**Tablica 3. Uzroci prekomjerne potrošnje elektrode i moguća rješenja [17]**

| UZROK   | RJEŠENJE  |
|---|---|
| 1. Neodgovarajuća veličina elektroda u odnosu na zahtijevanu struju | 1. Koristiti veću elektrodu ili prilagoditi struju veličini elektrode |
| 2. Rad s krivim polaritetom   | 2. Promijenite polaritet struje                                       |

|  |  |
|--|--|
| 3. Prisutnost neželjenih tvari na ili unutar elektrode | 3. Ukloniti neželjene čestice, zatim ponovo pripremiti elektrodu za korištenje |
| 4. Neispravan zaštitni plin                            | 4. Zamijeniti s ispravnim plinom (bez kisika ili CO <sub>2</sub> )             |

- Neredoviti električni luk:

**Tablica 4. Uzroci neredovitog električnog luka i moguća rješenja [17]**

| UZROK  | RJEŠENJE   |
|--|--|
| 1. Neispravan napon (predugačak el. luk)               | 1. Održavati kraći el. luk   |
| 2. Premala struja u odnosu na za veličinu elektrode    | 2. Koristiti manju elektrodu ili prilagoditi jačinu struje                     |
| 3. Prisutnost neželjenih tvari na ili unutar elektrode | 3. Ukloniti neželjene čestice, zatim ponovo pripremiti elektrodu za korištenje |

- Neželjeni uključci volframa i oksida u zavarima:

**Tablica 5. Uzroci neželjenog uključka volframa i oksida u zavarima i moguća rješenja [17]**

| UZROK   | RJEŠENJE  |
|---|---|
| 1. Loša tehnika pokretanja luka                                 | 1. Ne koristiti pokretanje luka metodom trenja. Preporučuje se korištenje bakrene ploče za udar te visokofrekventnog pokretanja luka kako bi se osigurala čistoća zavora i očuvala elektroda. |
| 2. Prekomjerna struja u odnosu na veličinu volframove elektrode | 2. Prilagoditi struju ili koristiti veću volframovu elektrodu   |
| 3. Nepažljivi kontakt elektrode s talinom                       | 3. Održavati pravilnu duljinu luka i materijala za punjenje   |
| 4. Upotreba prekomjerne dužine elektrode                        | 4. Smanjiti dužinu elektrode na preporučene vrijednosti   |

- Poroznost zavora:

**Tablica 6. Uzroci poroznosti zavora i moguća rješenja [17]**

| UZROK   | RJEŠENJE  |
|---|---|
| 1. Zarobljene nečistoće, vodik, zrak, dušik     | 1. Ne zavarivati na vlažnom materijalu, pravilno pripremiti površinu za zavarivanje |
| 2. Pokvarena plinska crijeva ili labavi spojevi | 2. Uvijek provjeriti crijeva i spojeve zbog curenja                                 |
| 3. Materijal za punjenje je vlažan (aluminij)   | 3. Potrebno osušiti materijal za punjenje u pećnici prije zavarivanja               |
| 4. Materijal za punjenje je mastan ili prašnjav | 4. Zamijeniti materijal za punjenje   |

- Neispravno korištenje zaštitnih plinova:

**Tablica 7. Uzroci neispravnog korištenja zaštitnih plinova i moguća rješenja [17]**

| UZROK  | RJEŠENJE   |
|--|--|
| 1. Začepljenje plinskog toka ili curenje u crijevima ili TIG pištolju za zavarivanje | 1. Potrebno locirati i ukloniti začepljenje ili curenje  |
| 2. Prebrzi pomak luka izlaže taljeni zavar atmosferi                                 | 2. Koristiti se sporijim pomakom ili pažljivo povećati protok plina do sigurne razine ispod one koja stvara pretjerane turbulencije. Koristiti zaštitnu čašu sa stražnjim štitom |
| 3. Vjetar ili propuh   | 3. Postaviti odgovarajuće zaštite od vjetra oko područja zavara  |
| 4. Prekomjerna dužina elektrode  | 4. Smanjiti dužinu elektrode   |
| 5. Prekomjerne turbulencije u plinskom toku  | 5. Promijeniti dijelove za uštedu plina ili dijelove s plinskom lećom  |

Unatoč svojoj kompleksnosti i velikoj ovisnosti o sposobnosti samog zavarivača, današnja industrija, a samim time i proizvodnja tlačne opreme je nezamisliva bez TIG postupka zavarivanja, jer tako visoko kvalitetnu, čistu, urednu i bez troske zavarenu površinu je teško postići bilo kojim drugim postupkom zavarivanja. Upravo zbog toga često se koristimo kombinacijom kvaliteta + ekonomičnost, odnosno TIG + REL postupkom zavarivanja tlačne opreme.

#### **5.4. Kombinacija TIG + REL za zavarivanje tlačne opreme [15]**

Kombinacija TIG i REL postupka zavarivanja koristi se kako bi se iskoristile prednosti obje metode. Na primjer, TIG postupak primjenjuje se za precizno zavarivanje početnog sloja, odnosno korijena zavara, dok se REL postupak koristi za naknadne slojeve, osobito kod debljih dijelova tlačne opreme. Takva kombinacija omogućuje optimalnu kvalitetu, veću brzinu i ekonomičnost zavarivanja.

Karakteristike takve kombinacije postupaka su:

- Preciznost i čistoća;
- Mogućnost zavarivanja raznih metala;
- Ekonomičnost i omogućeno zavarivanje debljih materijala u svim pozicijama.

## 6. OSIGURAVANJE SUSTAVA KVALITETE ZAVARIVANJA PRI IZRADI TLAČNE OPREME

Kao što je ranije navedeno, sigurnost prilikom proizvodnje i korištenja opreme pod tlakom je od primarnog značaja. Stoga je potrebno uspostaviti sustav osiguravanja kvalitete tlačne opreme. Osiguranje kvalitete obuhvaća složen sustav organizacijsko-tehničkih mjera i postupaka koji služe za postizanje i održavanje visokog stupnja kvalitete i sigurnosti u proizvodnji. Kontrola i ispitivanje, iako važni, čine samo jedan segment ovog sustava.

### 6.1. Postupci kontrole [18]

Postupci kontrole mogu se podijeliti na tri kronološki definirane faze:

- Kontrola prije početka zavarivanja;
- Kontrola tijekom izvođenja zavarivanja;
- Kontrola nakon završetka zavarivanja.

Izostavljanje bilo koje od ovih faza, posebno kod zahtjevnih konstrukcija poput tlačne opreme, može dovesti do problema. Ti problemi možda neće biti odmah vidljivi, ali će sigurno utjecati na pouzdanost zavarenog spoja tijekom uporabe konstrukcije. Zbog toga je neophodno provoditi kontrolu organizirano i dosljedno, bez ikakvih kompromisa.

#### 6.1.1. Kontrola prije početka zavarivanja [18]

Kontrola prije početka zavarivanja uključuje pregled dokumentacije, kako projektne tako i radioničke. Ovaj se postupak često naziva kontrolom tehnološkičnosti konstrukcije, jer omogućuje otklanjanje većine nedoumica i tehničkih izazova prije samog početka radova. Na ovaj način moguće je pravovremeno riješiti probleme ili prilagoditi projektne zahtjeve, čime se izbjegavaju poteškoće tijekom izvođenja zavarivanja.

Prema zahtjevima niza normi HRN EN ISO 3834 („Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem materijala“), sudjelovanje odgovornog osoblja za zavarivanje, poput IWE (International Welding Engineer) inženjera, ključno je prilikom pregleda tehničke dokumentacije. To osigurava da su sve

zavarivačke aktivnosti usklađene s tehničkim zahtjevima. Svi zavari moraju biti jasno definirani i označeni u priloženoj dokumentaciji, kako bi se spriječile pogreške i nedosljednosti tijekom izrade.

Prije početka zavarivanja također je potrebno provesti kontrolu osnovnog i dodatnog materijala. U većini slučajeva, ova se kontrola provodi uspoređivanjem vjerodostojnosti prateće dokumentacije, poput atesta, certifikata, izjava i oznaka sukladnosti.

Kontrola tehnološkog redoslijeda zavarivanja također je važan korak, jer doprinosi smanjenju naprezanja i deformacija konstrukcije te olakšava i ubrzava sam postupak zavarivanja. Osim toga, postupak zavarivanja mora provoditi kvalificirani i certificirani zavarivač. Njegove se sposobnosti redovito provjeravaju u skladu s vrstom certifikata koji posjeduje te specifičnim normama za materijale i postupke.

Uz navedene postupke, kontrola prije zavarivanja obuhvaća i sljedeće aktivnosti:

- Kontrola pripremnih i izvršnih vremena;
- Kontrola pripreme radnog mjesta;
- Utvrđivanje kontrolnog alata i pribora;
- Kontrola pripreme za zavarivanje;
- Kontrola strojeva i uređaja;
- Kontrola opreme i uvjeta za obradu i čuvanje dodatnog materijala.

Svi ovi postupci kontrole, osiguravaju potpunu spremnost za zavarivanje te značajno smanjuju rizik od grešaka i problema tijekom procesa zavarivanja.

### **6.1.2. Kontrola tijekom postupka zavarivanja [18]**

Tijekom procesa zavarivanja potrebno je provoditi sustavnu kontrolu kako bi se osigurala usklađenost sa svim zahtjevima tehničke dokumentacije, normama i standardima. Ova faza kontrole ključna je za pravovremeno uočavanje i ispravljanje eventualnih odstupanja koja bi mogla utjecati na kvalitetu zavarenog spoja.

Kontrola tijekom procesa zavarivanja sastoji se od sljedećih postupaka:

1. Kontrola pripajanja;



2. Kontrola postupka zavarivanja;
3. Kontrola redosljedna zavarivanja;
4. Kontrola parametara i ostalih uvjeta zavarivanja;
5. Kontrola označivanja zavora;
6. Kontrola zavarivanja posebnih detalja;
7. Međufazna nerazorna kontrola;
8. Provjera dimenzija i deformacije;
9. Kontrola postupaka toplinske obrade u tijeku zavarivanja.

### **6.1.3. Kontrola nakon zavarivanja [18]**

Ako su radovi u svim prethodnim fazama provedeni savjesno i dosljedno, postupci kontrole nakon zavarivanja trebali bi se svesti na završne provjere koje logično proizlaze iz procesa izrade te služiti isključivo kao dokaz kvalitete izvedenog posla. Međutim, iskustvo pokazuje da to u praksi često nije slučaj.

Pojava pogrešaka u zavarenom spoju u ovoj fazi ne upućuje, kako se često pretpostavlja, isključivo na pogreške zavarivača, već gotovo u potpunosti na zanemarene ili preskočene kontrolne obveze, koje se lako mogu provjeriti. Ako se pri završetku proizvodnje pojave problemi s kompletiranjem i izdavanjem sve potrebne dokazne dokumentacije, to jasno ukazuje na propuste u procesu kontrole, što znači da sustav kontrole nije u potpunosti ispunio svoj zadatak.

Postupci koji spadaju u kontrolu nakon zavarivanja su:

1. Detaljna vizualna kontrola;
2. Kontrola površinske obrade zavarenog spoja;
3. Mjerenje ukupne deformacije;
4. Praćenje možebitnih popravka zavarenog spoja;
5. Nerazorna kontrola popravka;
6. Kontrola toplinske obrade nakon zavarivanja;
7. Nerazorna kontrola;
8. Ispitivanje hidrostatskim tlakom ili kontrola nepropusnosti spoja;
9. Kontrola uzoraka rezanjem;

10. Izdavanje cjelokupne kontrolne dokumentacije.

## **6.2. Vizualna kontrola [18]**

Vizualna kontrola predstavlja ključni čimbenik u procesu nastajanja zavarenog spoja, uz sam postupak zavarivanja. To je jedina metoda kontrole bez razaranja koja može identificirati, predvidjeti mjesto i uzrok nastanka greške te pridonijeti donošenju odluka u svim fazama nastajanja zavarenog spoja. Temeljita vizualna kontrola obavezna je prije provođenja bilo koje druge metode nerazornog ispitivanja. Budući da je osnovni „instrument” vizualne kontrole ljudsko oko i iskustvo, ova metoda se ističe kao najekonomičnija.

Osoblje koje obavlja vizualni pregled mora biti upoznato s relevantnim normama, pravilima i specifikacijama, pri čemu se moraju držati propisanih procedura. Također, obavezna je certifikacija osoblja prema HRN EN ISO 9712:2012 Nerazorno ispitivanje. Kvalifikacija i certifikacija NDT (Non-Destructive Testing) osoblja.

### **6.2.1. Vizualna kontrola pripreme spoja prije početka postupka zavarivanja [18]**

Vizualnom kontrolom prije procesa zavarivanja provjerava se kako je izvedena priprema spoja za zavarivanje. Kod kontrole pripreme spoja provjerava se:

- Oblik i dimenzije pripreme prema specifikaciji zavarivanja;
- Čistoća pripremnih površina spojeva za zavarivanje;
- Način spajanja i pozicioniranje dijelova prema dokumentaciji i uputama.

Provjera razmaka i smaknutosti od nužnog je značaja za postizanje kvalitetnog provara korijena zavara. Neadekvatna priprema spoja može rezultirati nesukladnošću zavara sa zadanim tehničkim zahtjevima.

### **6.2.2. Vizualna kontrola tijekom zavarivanja [18]**

Tijekom procesa zavarivanja neophodna je stalna kontrola kako bi se osigurala kvaliteta zavara i usklađenost s tehničkim specifikacijama. Ova kontrola uključuje sljedeće korake:

- Čišćenje nakon svakog prolaza - prije izvođenja svakog sljedećeg prolaza, potrebno je temeljito očistiti površine zavara. Posebna pažnja posvećuje se čišćenju područja između deponiranog metala zavara i spojenih površina, uključujući rubove žlijeba;
- Provjera nepravilnosti - vizualnim pregledom provjerava se prisutnost nepravilnosti, poput pukotina ili kaverni. Ako se uoče takve nesukladnosti, potrebno je odmah poduzeti odgovarajuće mjere za njihovo uklanjanje prije nastavka zavarivanja;
- Oblik deponiranog metala - oblik deponiranog metala zavara i njegov položaj u odnosu na osnovni metal moraju biti takvi da se osigura kvalitetno pretaljivanje tijekom sljedećeg prolaza;
- Dubina i oblik žlijebljenja - dubina i oblik žlijebljenja ili brušenja trebaju odgovarati uputama iz specifikacije zavarivanja. Ako se zahtijeva potpuno uklanjanje metala zavara, uspoređuje se s originalnim oblikom pripreme.

Pravilna i kontinuirana kontrola tijekom zavarivanja ključna je za osiguravanje kvalitete i dugotrajnosti zavarenog spoja.

### **6.2.3. Vizualna kontrola nakon zavarivanja [18]**

Vizualna kontrola nakon zavarivanja temelji se na inspekciji zavarenog spoja kako bi se utvrdilo zadovoljava li kriterije prihvatljivosti prema normi HRN EN ISO 5817. Posebna pažnja posvećuje se sljedećim aspektima:

- Čišćenje i pretaljivanje zavara - sva troska mora biti uklonjena, ručno ili mehanički. Površine zavara ne smiju pokazivati tragove alata ili oštećenja nastalih djelovanjem električnog luka. Kod kutnih i sučelnih spojeva, gdje dolazi do pretaljivanja i slijevanja taline, ne smije biti naljepljivanja;
- Oblik i dimenzije zavara - oblik lica i korijena zavara, kao i nadvišenja, moraju biti u skladu s normom. Površina zavara mora biti pravilna, uz prihvatljiv izgled valovitosti zavara i zadovoljavajući vizualni izgled. Širina zavara mora biti jednolika duž cijelog spoja te udovoljavati zahtjevima norme ili projektne dokumentacije.

Vizualna kontrola nakon zavarivanja osigurava usklađenost zavarenih spojeva s normativnim zahtjevima i doprinosi postizanju dugotrajnosti i pouzdanosti zavara.

### 6.3. Nerazorne metode kontrole zavarenih spojeva [18]

Osim vizualne kontrole koja se provodi golim okom i jednostavnim pomagalicama, zavarene spojeve potrebno je ispitati i drugim nerazornim metodama kako bi se osigurala njihova kvaliteta, a da pritom ne dođe do oštećenja zavarenih spojeva. U tu svrhu koriste se različite tehnike poput rendgenskih zraka, radioizotopskog zračenja, zvučnih valova, magneta te penetrantske metode.

#### 6.3.1. Metoda prozračivanja [18]

Defektoskopija metodom prozračivanja temelji se na svojstvima X (rendgenskih) i gama (radioizotopskih) zraka, koje za razliku od vidljive svjetlosti imaju sposobnost prodiranja kroz sve poznate materijale. Prilikom prolaska kroz materijal, zračenje se, ovisno o svojstvima i debljini materijala, smanjuje i apsorbira dio svoje energije. Na izlazu iz materijala energija zračenja je niža nego na ulazu, što znači da je materijal apsorbirao dio primarnog zračenja. Za svaki materijal poznat je stupanj apsorpcije.

Ako se u materijalu nalaze nehomogenosti, one mijenjaju svojstva apsorpcije. Na mjestima gdje se nalaze nehomogenosti, poput grešaka u zavaru, apsorpcija zračenja razlikuje se od ostalih dijelova materijala. Na "izlazu" zračenja iz materijala, intenzitet zračenja bit će različit na mjestima grešaka u usporedbi s homogenim dijelovima.

Prednosti radiografske metode kontrole zavarenih spojeva:

- Mogućnost dobivanja trajnog dokumenta o pronađenim pogreškama, koji se može ponovno koristiti za usporedbu pri kasnijim pregledima konstrukcije i utvrđivanju promjena;
- Pogodnost za naknadnu potvrdu nalaza i ocjena od strane nadzornih tijela;
- Visoka osjetljivost na otkrivanje pogrešaka, uključujući pogreške veličine od 1-2 % debljine materijala;
- Mogućnost snimanja zavarenih spojeva velikih duljina;
- Jednostavna identifikacija mjesta pogreške u zavaru;
- Odvojenost procesa snimanja i ocjenjivanja – snimanje provodi stručno osoblje, dok se ocjena prepušta specijalistima za ovu vrstu ispitivanja.

Nedostaci radiografske metode:

- Potreba za pristupom s obje strane ispitivanog predmeta;
- Nužnost zaštite od zračenja, što povećava troškove ispitivanja;
- Visoka cijena opreme i izrade radiograma;
- Ograničenje debljine ispitivanog materijala, ovisno o jakosti izvora zračenja;
- Neprikladnost za konstrukcije s izraženim razlikama u debljini stijenke;
- Niska vjerojatnost otkrivanja pogrešaka male debljine, posebno ako su orijentirane poprečno na smjer zračenja.

Zbog navedenih nedostataka, posebice visokih troškova, radiografska kontrola najčešće se koristi za ispitivanje proizvoda velike pojedinačne vrijednosti.

### **6.3.2. Metoda prozvučivanja [18]**

Metoda prozvučivanja temelji se na odašiljanju zvučnih valova određenog spektra frekvencija kroz materijal i obuhvaća pronalaženje pogrešaka s pomoću ultrazvuka, što se naziva ultrazvučna defektoskopija. Ovom metodom ne utvrđuju se pogreške u doslovnom smislu, već se određuju veličina, položaj i orijentacija tzv. reflektora, odnosno razdjelnih ploha u materijalu i samih pogrešaka. Često se koristi u kombinaciji s radiografskom metodom, pri čemu se ultrazvukom otkriva postojanje pogreške, a zatim se radiografski snimka koristi za detaljnu analizu i ocjenu.

Prednosti ultrazvučne metode:

- Ispitivanje se može provoditi na materijalima neograničene debljine;
- Pristup ispitivanom predmetu potreban je samo s jedne strane;
- Metoda je bezopasna i ne zahtijeva upotrebu zaštitnih sredstava;
- Oprema je kompaktna, lagana i lako prenosiva;
- Omogućuje jednostavno otkrivanje pogrešaka u zavarenim spojevima;
- Neosjetljiva je na vanjske uvjete poput vlage, temperature i vjetra.

Nedostaci ultrazvučne metode:

- Ne ostavlja izravnu i trajnu evidenciju rezultata koja bi se mogla koristiti za naknadne provjere;
- Rezultati ispitivanja uvelike ovise o znanju, iskustvu i savjesnosti ispitivača;
- Pouzdano određivanje pogrešaka često zahtijeva pristup s više strana, što nije uvijek moguće i može zahtijevati značajno vrijeme;
- Potrebno je stručno osposobljavanje i intenzivna praksa za ispitivače, što je dugotrajan i skup proces;
- Metoda je neprikladna za ispitivanje konstrukcija složenih oblika.

### **6.3.3. Magnetska metoda [18]**

Ova metoda je najraširenija u praktičnoj primjeni, prvenstveno zahvaljujući jednostavnosti postupka i relativno jeftinim uređajima. Iako je metoda orijentirana na masovnu i velikoserijsku proizvodnju koristiti se i pri kontroli zavarenih spojeva. Metoda se dijeli na dvije osnovne skupine, kontrolu feromagnetnih i kontrolu ne feromagnetnih metala i nemetala. Ova metoda omogućuje najlakše otkrivanje pogrešaka poput pukotina, zarezata i većih uključaka, naročito onih koji se nalaze blizu ispitne površine, te je uz jednostavnost i ekonomičnost to najveća prednost ove metode

Dok s druge strane glavni nedostatak ove metode je da nema mogućnost otkrivanja točnih dimenzija pogrešaka i također da učinkovitost metoda otpada s porastom dubine potpovršinske pogreške u materijalu.

### **6.3.4. Ostale nerazorne metode kontrole zavarenih spojeva [18]**

Osim uobičajenih i najčešće korištenih nerazornih metoda ispitivanja zavarenih spojeva, postoje i dodatne metode koje se primjenjuju za ispitivanje nepropusnosti. Ove metode su često primjenjive pri kontroli izrade tlačne opreme te uključuju:

- Penetrantska metoda - metoda se temelji na svojstvu određenih tekućina da prodiru u najmanje šupljine na površini te ih u potpunosti ispune. Takve tekućine, koje se pretežno baziraju na lakim uljima, nazivaju se penetrantima.

- Vakuumska kontrola nepropusnosti zavarenog spoja - ova metoda se najčešće primjenjuje kod izrade velikih spremnika za tekućine. Prisutnost propusnosti spremnika dokazuje se pojavom mjehurića.
- Kontrola zrakom i sapunicom - ova metoda se koristi za ispitivanje niskotlačnih posuda. Na vanjsku stranu zavarenog spoja nanosi se sapunica, dok se u posudu unosi vrlo nizak predtlak zraka. Ako posuda propušta, na površini će se pojaviti mjehurići sapunice.
- Hidrostatska kontrola - ova metoda ispitivanja provodi se prema zahtjevima rigoroznih tehničkih propisa, a koristi se nakon završetka procesa zavarivanja posuda pod tlakom ili cjevovoda. Hidrostatsko ispitivanje od iznimnog je značaja za ovaj rad te će biti detaljnije obrađeno u nastavku.
- Kontrola istjecanja halogenih plinova - u suvremenoj primjeni ova metoda najčešće koristi helij kao medij za ispitivanje. Iako složenija, metoda je vrlo korisna za provjeru posuda s višim zahtjevima za nepropusnost. Halogeni plinovi, zahvaljujući svojim vrlo malim molekulama, lakše prodiru kroz nehomogenosti nego voda. Ova metoda nužna je za provjeru zavarenih spojeva u rashladnoj tehnici, na plinskim postrojenjima te za posude i cjevovode u nuklearnoj energetici.

### 6.3.5. Dokumentacija

Na kraju kontrola kako bi se utvrdilo jesu li sve kontrolne aktivnosti provedene u traženom opsegu i prema odabranim procedurama obavezno je vođenje dokumentacije.

Dokumentacija mora, u načelu, sadržavati sljedeće podatke:

- Naziv izvođača radova;
- Naziv kontrolnog tijela;
- Oznaku objekta;
- Materijal;
- Vrstu spoja;
- Debljinu materijala;
- Postupak zavarivanja;
- Kriterij prihvatljivosti;

- Nepravilnosti koje su veće od dozvoljenih i njihova lokacija;
- Opseg pregleda s referentnim crtežima i skicama;
- Kontrolna mjerila i alate;
- Rezultat kontrole u odnosu na kriterij prihvatljivosti;
- Ime osobe koja je vršila kontrolu i datum kontrole.

Ako se zahtjeva, pregledani zavari se moraju označiti i identificirati, a po potrebi mogu se načiniti i fotografije zavara s naznačenim nepravilnostima.

#### **6.4. Osnovni mjerni uređaji pri nadzoru zavarivanja [18]**

Mjerenje, ispitivanje i obrada mjernih podataka u zavarivanju imaju posebnu važnost radi osiguravanja kvalitete i pridržavanja definiranih tehnoloških smjernica. Koordinator zavarivanja moraju biti upoznati sa svim aspektima mjerenja i mogućnostima mjernih uređaja, posebno danas kada je razvoj tehnologije omogućio izradu jednostavnih i kvalitetnih mjernih uređaja, koji omogućuju strogo praćenje parametra zavarivanja, ali uz to osiguravaju sigurnosti samog zavarivača.

##### **6.4.1. Mjerenje parametara zavarivanja [18]**

Određivanje jakosti struje, napona i brzine zavarivanja ključno je za precizan izračun unosa topline, čime se stvaraju uvjeti za postizanje željene mikrostrukture, geometrije zavara te za utvrđivanje primjenjivosti stvarnih uvjeta u odnosu na zahtjeve kvalifikacije postupka zavarivanja.

Tijekom mjerenja parametara zavarivanja najčešće se prate sljedeće vrijednosti:

- Struja zavarivanja,  $I$ , (A)
- Napon zavarivanja,  $U$ , (V)
- Brzina žice kod MIG/MAG postupka,  $v_z$ , (m/min)
- Protok zaštitnog plina,  $Q_{pl}$ , (l/min)
- Brzina zavarivanja kod mehaniziranog zavarivanja,  $v_z$ , (cm/min)

Za osiguranje točnosti ovih parametara potrebno je provoditi kontrolu ispravnosti uređaja za zavarivanje u skladu sa zahtjevima norme HRN EN 50504:2008 – Validacija elektrolučne opreme.



Ovom validacijom utvrđuje se zadovoljavaju li izvor struje i ostali dijelovi opreme za zavarivanje propisane operativne značajke. Pritom se koriste umjereni kontrolni mjerni uređaji kako bi se usporedile stvarne vrijednosti struje ili napona s vrijednostima očitanim na uređaju. Svrha validacije je osigurati da parametri zavarivanja ostanu unutar propisanih granica, čime se direktno utječe na kvalitetu zavara. Preporučuje se da se ovakva validacija provodi jednom godišnje, jer ako su parametri zavarivanja pogrešni, izvedba zavara će isto tako biti pogrešna.

Osim parametara zavarivanja, potrebno je mjeriti i kontrolirati temperature predgrijavanja i međuprolaza. Temperatura je ključan indikator niza tehnoloških čimbenika kojima se nadzire i usmjerava cijeli proces zavarivanja. Mjerenjem temperature moguće je definirati toplinski ciklus grijanja i hlađenja tijekom zavarivanja te optimizirati proces u odnosu na unesenu toplinu i uvjete zavarivanja. Mjerenje temperature može se provoditi kontaktno ili beskontaktno

Kontinuirano praćenje ovih parametara doprinosi osiguranju kvalitete zavara i postizanju usklađenosti sa specifikacijama procesa.

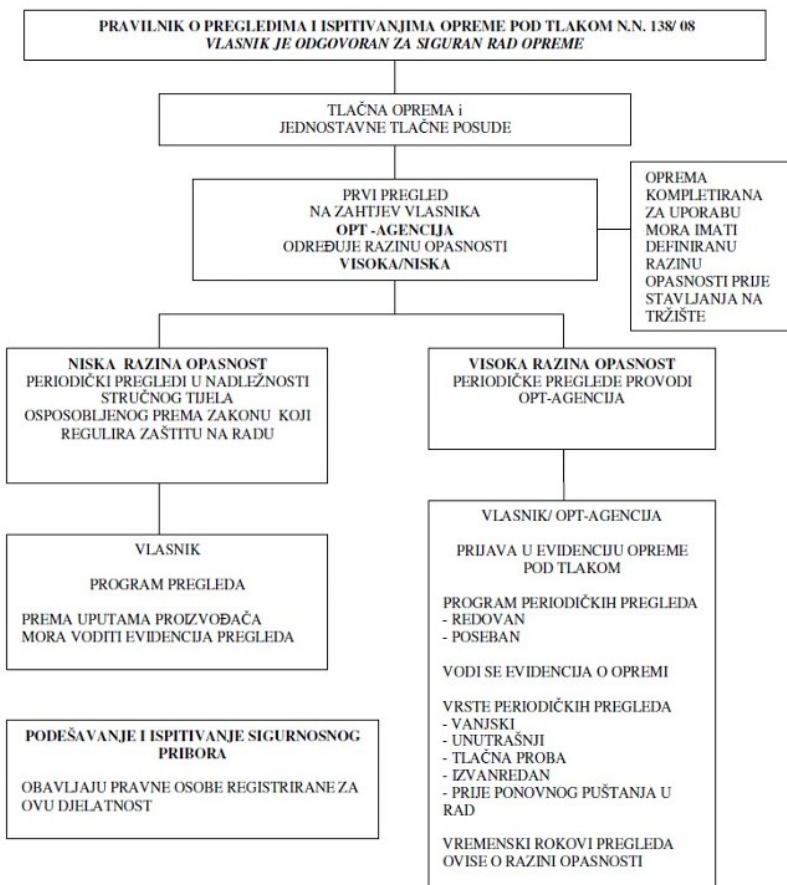
### **6.5. Pregledi i ispitivanja opreme pod tlakom visoke razine sigurnosti [19]**

Osnova za sigurnosno tehničku ocjenu opreme pod tlakom visoke razine opasnosti je periodički pregled koji može biti:

- Vanjski pregled,
- Unutarnji pregled,
- Ispitivanje tlakom (tlačna proba).

Prilikom provođenja periodičkih pregleda i ispitivanja opreme pod tlakom visoke razine opasnosti, nužno je pridržavati se svih sigurnosnih mjera koje je propisao proizvođač opreme, kao i relevantnih zakonskih propisa te internih dokumenata korisnika. Ispitivanja se moraju provoditi u skladu s važećim normama, od strane kvalificiranih osoba koje zadovoljavaju minimalne zahtijevane kompetencije, te prema pisanim radnim uputama za konkretnu opremu pod tlakom.

Oprema pod tlakom visoke razine opasnosti kod koje se tijekom periodičkih pregleda utvrde nedostaci koji bitno utječu na sigurnost ljudi, imovine ili okoliša mora se odmah povući iz uporabe te se ne smije koristiti dok se ne otklone uočeni nedostaci.



**Slika 11. Shematski prikaz pregledavanja i ispitivanja opreme pod tlakom prema pravilniku [2]**

### 6.5.1. Vanjski pregled [19]

Vanjskim pregledom ocjenjuje se stanje opreme pod tlakom, pri čemu se pregledavaju vanjske površine, sigurnosni i drugi uređaji te radna okolina i mjesto postavljanja opreme. Pregled obuhvaća i provjeru tehničke dokumentacije o radu opreme, uključujući zapise o redovnom održavanju i servisiranju prema uputama proizvođača.

Vanjski pregled uglavnom se provodi kao vizualni pregled. Međutim, ako se vizualnim pregledom ne može sa sigurnošću utvrditi stanje opreme pod tlakom ili se tijekom pregleda otkriju oštećenja i nedostaci, mogu se prema potrebi primijeniti dodatni pregledi i ispitivanja kako bi se donijela pouzdana sigurnosno-tehnička ocjena.

### 6.5.1.1. Vanjski pregled cjevovoda [19]

Vanjski pregled cjevovoda provodi se radi sigurnosno tehničke ocjene vanjskog stanja cjevovoda u smislu utvrđivanja sljedećih parametara:

- Uporabe u skladu s namjenom;
- Utvrđivanja trenutačnog stanja u odnosu na stanje zahtijevano projektnom dokumentacijom;
- Održavanja cjevovoda;
- Stanja sigurnosnog pribora i druge zaštitne opreme.

Vanjski pregled cjevovoda u pravilu se provodi na cjevovodu koji je u uporabi. Djelomični vanjski pregled, prihvatljiv je ako omogućuje donošenje zaključka o sigurnosno-tehničkom stanju cijelog cjevovoda. Pri tome se pregledavaju reprezentativni dijelovi cjevovoda kako bi se na temelju njih moglo procijeniti opće stanje sustava. Na primjer, kod izoliranih cjevovoda potrebno je na reprezentativnim mjestima ukloniti izolaciju radi procjene stupnja vanjske korozije.

### 6.5.2. Unutarnji pregled [19]

Prilikom unutarnjeg pregleda ovlašteno inspekcijsko tijelo provodi provjeru stanja unutarnjih površina tlačne opreme. Pregled obuhvaća procjenu mogućih pojava korozije, pukotina, udubljenja, ispupčenja, slojevitosti, kao i utjecaja radnog medija na unutarnje površine opreme. Unutarnji pregled u pravilu se provodi na način sličan vanjskom pregledu, uz mogućnost proširenja dodatnim ispitivanjima koristeći priznate metode prema potrebi.

U slučajevima kada se stanje tlačne opreme ne može adekvatno utvrditi zbog nedostupnosti pojedinih dijelova ili drugih ograničenja, potrebno je ukloniti dijelove opreme koji onemogućuju provođenje unutarnjeg pregleda. Komponente opreme pod tlakom koje iz opravdanih tehničkih razloga nije moguće pregledati iznutra, podvrgavaju se vanjskom pregledu površina. Po potrebi, dodatno se primjenjuju mjerenja debljine stijenki, ispitivanje tlakom te druge nerazorne metode ispitivanja.

Kod unutarnjeg pregleda tlačne opreme izrađene od umjetnih masa i kompozitnih materijala, potrebno je posebno obratiti pažnju na vrstu građevnog materijala, konstrukciju opreme te upute

proizvođača. U tom kontekstu, važno je primijeniti odgovarajuće metode ispitivanja koje su prilagođene specifičnostima materijala i konstrukcije.

Djelomični unutarnji pregled tlačne opreme prihvatljiv je u slučajevima kada omogućuje donošenje zaključaka o cjelokupnom sigurnosno-tehničkom stanju opreme po analogiji. Pri tome je potrebno pregledati reprezentativne dijelove opreme, na temelju kojih se donosi procjena o stanju preostalih dijelova.

### **6.5.3. Ispitivanje tlakom**

Završno ocjenjivanje tlačne opreme obuhvaća ispitivanje otpornosti na tlak, koje se najčešće provodi hidrostatskom probom. Ova proba se izvodi pri tlaku koji odgovara maksimalnom opterećenju kojem će tlačna oprema biti izložena tijekom rada, uz povećanje tlaka na razinu od 1,2 do 1,5 radnog tlaka, ovisno o primjeni. [1]

Ispitivanje tlakom obvezno je u slučajevima kada rezultati vanjskog i unutarnjeg pregleda tlačne opreme nisu dovoljni za donošenje zadovoljavajuće sigurnosno-tehničke ocjene. [19]

Proba se provodi pod nadzorom ovlaštenog inspekcijskog tijela prema istim postupcima i standardima koji se primjenjuju za novu tlačnu opremu. Tijekom ispitivanja tlakom, oprema se pregledava radi uočavanja eventualnih pukotina, propuštanja ili deformacija. Oprema mora biti pod ispitnim tlakom dok se pregled ne završi, ali ne kraće od 10 minuta. Nakon završetka ispitivanja provodi se dodatni pregled radi utvrđivanja eventualnih vidljivih promjena oblika. [19]

Ispitivanje tlakom može se provesti korištenjem tekućine (hidraulička tlačna proba) ili plina (pneumatska tlačna proba). U slučaju pneumatske probe, obvezna je primjena odgovarajućih mjera zaštite koje odobrava ovlašteno inspekcijsko tijelo. [19]

### **6.6. Sigurnosni pribor [1]**

Kako bi se osigurao siguran rad tlačne opreme, a i ispitivanje same opreme, koristi se radni sigurnosni pribor. Konstruiran i izrađen tako da bi se postigla prikladna i pouzdana zaštita te da se, prema potrebi, vodi računa o održavanju i zahtjevima za ispitivanje uređaja.

Ovi uređaji konstruiraju se tako da tlak ne može trajno prekoračiti najveći dopušteni tlak PS, tu također spadaju i uređaji za praćenje temperature i uređaji za zaštitu od vanjskih požara.

### **6.7. Potrebe proizvođača tlačne opreme za osiguravanje sustava kvalitete zavara [15]**

Za osiguranje kvalitete zavarivačkih radova, tvrtka mora imenovati odgovornu osobu za zavarivanje. Ovisno o opsegu posla, stručno osoblje za zavarivanje uključuju:

- Međunarodnog inženjera specijalista za zavarivanje (IWE – International Welding Engineer)
- Međunarodnog tehnologa za zavarivanje (IWT – International Welding Technologist)
- Međunarodnog specijalista za zavarivanje (IWS – International Welding Specialist)

Njihove ključne odgovornosti obuhvaćaju:

- Analizu i ocjenu ugovorne dokumentacije,
- Definiranje i propisivanje postupaka i parametara zavarivanja te odabir dodatnih materijala,
- Propisivanje pripreme spojeva za zavarivanje,
- Nadzor nad izvođenjem zavarivačkih radova,
- Organizaciju kvalifikacije i atestacije zavarivača.

Sve zavarivačke operacije smiju izvoditi isključivo kvalificirani i atestirani radnici s odgovarajućim certifikatima, u skladu sa zahtjevima standarda i ovlaštenih inspeksijskih tijela. Odobravanje zavarivača i koordinatora zavarivanja provodi se prema normama navedenim u dijelu 2.3. "Norme pri izradi tlačne opreme". Poslodavac je odgovoran za obuku, nadzor i kontrolu zavarivača te za uspostavu sustava označavanja koji omogućava jednoznačnu identifikaciju svakog zavarivača.

Popis zavarivača i koordinatora, zajedno s njihovim atestima, mora biti dostupan unutar tvrtke, dok dokumentacija o njihovoj kvalifikaciji treba biti osigurana na gradilištu i dostupna nadzornom inženjeru investitora. Također, poslodavac je dužan voditi evidenciju o učestalosti grešaka svakog zavarivača, a nadzorni inženjer može zatražiti reatestaciju bilo kojeg zavarivača u bilo kojem trenutku.

Zavarivanje se mora provoditi prema zahtjevima konstrukcije i tehnološkim uputama koje odobrava ovlašteni inženjer za zavarivanje (IWE). Za praktičnu provedbu postupaka zavarivanja odgovoran je specijalist za zavarivanje (IWS). Postupci zavarivanja odobreni su od strane tijela za ocjenu sukladnosti ili drugih relevantnih inspekcija, ovisno o vrsti proizvoda i zahtjevima kupca.

Na temelju zahtjeva konstrukcije i inspekcijskih zahtjeva, tehnolog izrađuje, a inženjer za zavarivanje odobrava procedure zavarivanja (WPS – Welding Procedure Specification). Te procedure detaljno opisuju korake i parametre zavarivanja, čime se potvrđuje da postupak i dodatni materijali zadovoljavaju tražene mehaničke i metalurške karakteristike zavarenog spoja.

Prije odobravanja WPS-a potrebno je provesti atestiranje postupka zavarivanja te izraditi zapis o atestiranju (WPAR/PQR – Welding Procedure Approval Record/Procedure Qualification Record). Atestiranje se provodi u skladu s važećim normama i propisima.

Sva navedena: pravila, norme, tehnologije i ostalo prikazat će se u eksperimentalnom dijelu rada na temelju prikaza procesa proizvodnje tlačne posude.

## 7. EKSPERIMENTALNI RAD [20]

U eksperimentalnom dijelu rada opisuje se proces proizvodnje tlačne posude na realnom primjeru proizvoda, odnosno isparivača UNP-1800 proizvedenog u tvrtki Macel plin d.o.o.

Tvrtka Macel plin d.o.o. osnovana je 2002. godine s ciljem pružanja usluga na području plinskog gospodarstva. U svojim počecima, tvrtka je prvenstveno bila orijentirana na prodaju mjerno-redukcijske opreme, s vremenom počinju nuditi usluge ispitivanja sigurnosnih ventila, te prodaju, servis i održavanja svojih proizvoda. Tvrtka posjeduje brojne certifikate u području proizvodnje tlačne opreme, koji su prikazani na slikama 12, 13 i 14.

|             |   |   |
|-------------|---|---|
| CERTIFIKAT  | <h1 style="margin: 0;">CERTIFIKAT</h1> <h2 style="margin: 0;">CERTIFICATE</h2>  |    |
| CERTIFIKAT  | <p><b>TPK-ZAVOD d.d. Certifikacijski odjel, prijavljeno tijelo za ocjenu sukladnosti opreme pod tlakom potvrđuje osposobljenost proizvođača za izvođenje zavarivačkih radova</b><br/> <i>TPK-Zavod d.d. Certification department, notified body for conformity assesment of pressure equipment certifies welding capability of manufacturer</i></p> |   |
| CERTIFICATE | <p><b>Certifikat broj:</b><br/><i>Certificate number:</i></p>   | <p><b>NB 2473 3834-C 005/23</b></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Proizvođač/Adresa:</b><br/><i>Manufacturer/Address:</i></p>   | <p><b>MACEL PLIN d.o.o.</b><br/> <b>Samoborska 15</b><br/> <b>HR-10090 Zagreb</b></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Referentna norma:</b><br/><i>Reference standard:</i></p>  | <p><b>HRN EN ISO 3834-2:2021</b></p>  |
| CERTIFICATE | <p><b>Područje aktivnosti:</b><br/><i>Scope of activities:</i></p>  | <p><b>Izrada i montaža cjevovoda, tlačnih posuda i čeličnih konstrukcija prema području aktivnosti pokrivanja iz ovog certifikata i izvještaja o certifikaciji.</b><br/> <i>Production and installation of piping, pressure vessels and steel structures according to the scope of activity of this certificate and certification report.</i></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Izveštaj o certifikaciji:</b><br/><i>Certification report:</i></p>  | <p><b>3834-I 005/23</b></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Mjesto proizvodnje:</b><br/><i>Manufacturing plant:</i></p>   | <p><b>Pustodol Začreški 19K, 49223 Sveti Križ Začretje</b><br/> <b>Moslavačka ulica 22, 10315 Novoselec</b></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Certifikat vrijedi do navedenog datuma te ostaje na snazi pod uvjetom zadovoljavajućih rezultata nadzornih pregleda.</b><br/> <i>Certificate is valid untill stated date only if satisfactory surveillance audit results are provided.</i></p>  |   |
| CERTIFICATE | <p><b>Vrijedi do:</b><br/><i>Valid until:</i></p>   | <p><b>10.05.2026.</b></p>   |
| CERTIFICATE | <p><b>Zagreb, 10.05.2023.</b></p> <p>TPK – ZAVOD d.d.<br/>         Certifikacijski odjel<br/>         Slavonska avenija 20<br/>         HR-10000 Zagreb<br/>         Tel: 01/2408-628<br/>         Fax: 01/2408-032<br/>         tpk-zavod@tpk-zavod.hr<br/>         www.tpk-zavod.hr<br/>         Stranica/page 1/2</p>                            | <p><b>TPK – ZAVOD d.d.</b><br/> <b>Certifikacijski odjel</b><br/> <b>Certification department</b><br/>         Prijavljeno tijelo za opremu pod tlakom<br/> <i>Notified body for pressure equipment</i><br/> <b>NB 2473</b></p> <p> <br/> <b>Zdravko Skočić, dipl.ing.</b></p> |
| CERTIFICATE |   | <p>17065-HAA</p>  <p>3143</p>  |


06-1034-C, rev. 2

Slika 12. Certifikat tvrtke Macel plin d.o.o. [20]

CERTIFIKAT

## PODRUČJE AKTIVNOSTI

### SCOPE OF ACTIVITY



**Proizvođač/Adresa:** **MACEL PLIN d.o.o.**  
*Manufacturer/Address:* **Samoborska 15**  
**HR-10090 Zagreb**

**Certifikat broj:** **NB 2473 3834-C 005/23**  
*Certificate number:*

**Referentna norma:** **HRN EN ISO 3834-2:2021**  
*Reference standard:*

**Vrsta proizvoda:** **Izrada i montaža cjevovoda, tlačnih posuda i čeličnih konstrukcija**  
*Type of products:* **Production and installation of piping, pressure vessels and steel structures.**

**Proizvodne norme:** **HRN EN 13445 HRN EN ISO 3834-2**  
*Production standards:* **HRN EN 13480 HRN EN ISO 9606-1**  
**HRN EN 1090-2 HRN EN ISO 14731**  
**HRN EN 15614-1**  
**i druge norme prema projektnoj dokumentaciji i ugovornim obvezama / and other standards according to design documentation and contractual agreements.**

**Grupe osnovnog materijala:** **1, 8, 11**  
*Parent materials groups:* **HRI CEN ISO/TR 15608:2014**

**Postupci zavarivanja:** **141-TIG (GTAW)**  
*Welding processes:* **135-MAG (GMAW)**  
**111-REL (SMAW)**  
**HRN EN ISO 4063:2012**


**Odgovorno osoblje za zavarivanje:** **HRN EN ISO 14731:2019**  
*Responsible Coordination Personnel:*

| Ime i prezime<br><i>Name and Surname</i> | Kvalifikacija<br><i>Qualification</i> | Funkcija, stupanj <sup>1)</sup><br><i>Job Function, Level</i> |
|--|---------------------------------------|---|
| Luka Hlebić                              | mag.ing.mech., IWE                    | Koordinator zavarivanja, C                                    |
| Nikola Katić                             | mag.ing.geo.                          | Zamjenik koordinatora zavarivanja                             |

<sup>1)</sup> Stupnjevi / Levels: C – Cjeloviti (*Comprehensive*), S – Specifični (*Specific*), B – Bazni (*Basic*)

Zagreb, 10.05.2023.

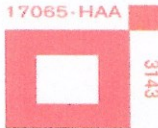
TPK – ZAVOD d.d.  
 Certifikacijski odjel  
 Slavenska avenija 20  
 HR-10000 Zagreb  
 Tel: 01/2409-628  
 Fax: 01/2408-032  
 tpk-zavod@tpk-zavod.hr  
 www.tpk-zavod.hr  
 Stranica/page 2/2



**TPK – ZAVOD d.d.**  
**Certifikacijski odjel**  
**Certification department**  
 Prijavljeno tijelo za opremu pod tlakom  
*Notified body for pressure equipment*  
**NB 2473**

*Zdravko Skočić, dipl.ing.*

17065-HAA



3143

\*NB-17734-C-1rev.2

Slika 13. Certifikat područja aktivnosti u kojem djeluje tvrtka Macel plin d.o.o. [20]



|   |   |   |
|---|---|---|
| CERTIFIKAT  | <b>CERTIFIKAT</b><br><b>CERTIFICATE</b>   |    |
|   | <b>Provjera proizvođača opreme pod tlakom prema<br/>RH Pravilniku o tlačnoj opremi (NN 79/16) i direktivi 2014/68/EU (PED)</b><br><i>Verification of manufacturer for pressure equipment according to<br/>RH Pressure equipment regulation (NN 79/16) and Directive 2014/68/EU (PED)</i>  |   |
| <b>Certifikat broj:</b><br><i>Certificate No.:</i>  | <b>NB 2473 3834-C-TO 005/23</b>   |   |
| <b>Proizvođač/Adresa:</b><br><i>Manufacturer/Address:</i>   | <b>MACEL PLIN d.o.o.</b><br><b>Samoborska 15</b><br><b>HR-10090 Zagreb</b>  |   |
|   | <b>Proizvođač je dokazao osposobljenost za proizvodnju prema modulu G u skladu s RH Pravilnikom o tlačnoj opremi (NN 79/16) i Direktivom 2014/68/EU (PED) te da zadovoljava zahtjeve za kvalitetu koju propisuju:</b><br><i>Manufacturer demonstrated competence for production according to module G in compliance with RH Pressure equipment regulation (NN 79/16) and Directive 2014/68/EU (PED) and fulfils quality requirements required by:</i> |   |
| <b>Pravilnici i norme:</b><br><i>Technical regulations and standards:</i>   | <b>RH Pravilnik o tlačnoj opremi (NN 79/16)</b><br><b>Direktiva 2014/68/EU (PED)</b><br><b>HRN EN ISO 3834-2:2021</b>   |   |
| <b>Ovjera:</b><br><i>Verification:</i>  | <b>Proizvodnja u skladu s Pravilnikom o tlačnoj opremi (NN 79/16), dodatak I, točka 3.1</b><br><i>Manufacture according to directive 2014/68/EU, Annex I, Clause 3.1</i>  |   |
| <b>Opseg:</b><br><i>Scope:</i>  | <b>Izrada i montaža cjevovoda i posuda pod tlakom kategorije II i III prema području pokrivanja iz izvještaja o certifikaciji.</b><br><i>Production and installation of pipelines and pressure vessels of category II and III according to the scope of validity in certification report.</i>   |   |
| <b>Izveštaj o certifikaciji:</b><br><i>Certification report:</i>  | <b>3834-I 005/23</b>  |   |
| <b>Mjesto proizvodnje:</b><br><i>Manufacturing plant:</i>   | <b>Pustodol Začretni 19K, 49223 Sveti Križ Začretje</b><br><b>Moslavačka ulica 22, 10315 Novoselec</b>  |   |
| <b>Vrijedi do:</b><br><i>Valid until:</i>   | <b>09.05.2026.</b>  |   |
|   | <b>Certifikat vrijedi do navedenog datuma te ostaje na snazi pod uvjetom zadovoljavajućih rezultata nadzornih pregleda. The Certificate is valid until stated date only if satisfactory surveillance audit results are provided.</b>  |   |
|   | <b>Zagreb, 10.05.2023.</b>  |   |
| <b>TPK – ZAVOD d.d.</b><br>Certifikacijski odjel<br>Slavonska avenija 20<br>HR-10000 Zagreb<br>Tel: 01/2409-628<br>Fax: 01/2408-032<br>tpk-zavod@tpk-zavod.hr<br>www.tpk-zavod.hr | <br><b>TPK – ZAVOD d.d.</b><br><b>Certifikacijski odjel</b><br><b>Certification department</b><br>Prijavljeno tijelo za opremu pod tlakom<br><i>Notified body for pressure equipment</i><br><b>NB 2473</b>   |  |
|   | <br><b>Zdravko Skočić, dipl.ing.</b>  |   |

Slika 14. Certifikat tvrtke Macel plin d.o.o za proizvodnju u skladu Pravilnika o tlačnoj opremi [20]

Svi ti certifikati dokazuju da je tvrtka pogodna za proizvodnju ovakve vrste opreme, te garantira veliki stupanj sigurnosti i kvalitete izrađene opreme, prema svim zahtjevima i pravilima koje zakon nalaže.

## 7.1. Opis i karakteristike isparivača UMP-1800

Isparivač je tlačna posuda s plaštom izrađenog od lima te dubokom podnicom na donjoj i gornjoj strani. Obično se koristi za isparavanje ukapljenog naftnog plina, poput propana ili butana. Primarna funkcija isparivača je pretvorba ukapljenog plina u plinovito stanje prije nego što se distribuira potrošačima ili koristi u industrijskim procesima.

Glavni priključci isparivača UNP-1800 su ulaz i izlaz plina, ulaz i izlaza ogrjevnog medija. Posuda još sadrži priključak za drenažu, priključke za armaturu te mjerne priključke kao i PSV, odnosno sigurnosni ventil za rasterećenje tlaka. Također, posuda sadrži priključak za ulaz čovjeka, koji omogućuje inspekciju i održavanje unutrašnjosti posude.

### 7.1.1. Tehničke karakteristike

Tlačna oprema ima sljedeće karakteristike:

- Dijelovi opreme su spojeni odgovarajućim vijcima ili zavarenim spojevima
- Maksimalni dozvoljeni radni tlak: PS = 16,5 bar (g)
- Projektna temperatura (min. / max.): TS = -10/100 °C
- Volumen spremnika: V = 6800 L
- Promjer: 1800 mm
- Grupa fluida u spremniku: 1
- Vrsta fluida u spremniku: plinoviti ili tekući, PD > 0,5 bar.

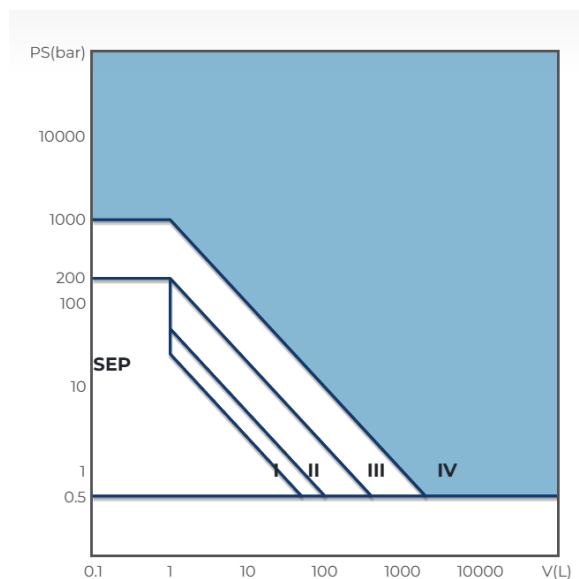
Dok su dimenzije dane u tablici 8.

Tablica 8. Dimenzije ispairivača UMP-1800 [20]

|                                   |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| Vanjski promjer plašta:           | 1800 mm            |
| Debljina stijenke plašta:         | 12 mm              |
| Duljina plašta:                   | 2000 mm            |
| Ukupna duljina posude:            | 3602 mm            |
| Vanjski promjer kape / podnice:   | 1800 mm            |
| Debljina stijenke kape / podnice: | min. 12 mm         |
| Priključak za ulaz/izlaz:         | 33,7x4/60,3x4,5 mm |
| Priključak za drenažu:            | 33,7x4 mm          |
| Priključak za ulaz/izlaz vode:    | 60,3x4,5 mm        |
| Priključak za ulaz čovjeka:       | 508x16 mm          |

### 7.1.2. Ocjena kategorije sukladnosti

Ocjena kategorije sukladnosti je provedena prema Pravilniku o tlačnoj opremi NN 79/2016., na temelju tehničkih karakteristika. Fluid koji se nalazi u spremniku se smatra fluidom grupe 1, dok je  $PS * V = 112200 \text{ bar L}$ . Uzimajući to u obzir i korištenje odgovarajućeg dijagrama (slika 15) za ocjenu kategorije sukladnosti dobiva se da oprema pripada u kategoriju opreme IV.



Slika 15. Dijagram za ocjenu kategorije sukladnosti [20]

S obzirom na to odabran je modul, odnosno postupak za ocjenu sukladnosti: PED modul G, što znači sukladnost na temelju pojedinačne provjere, te da proizvođač mora dostaviti čitavu tehničku

dokumentaciju i omogućiti inspekciju gotovog proizvoda pre nego što dobije CE oznaku sukladnosti.

### 7.1.3. Projektiranje isparivača UNP-1800

Isparivač UNP-1800 projektiran je prema standardu EN 13445 te Pravilniku o tlačnoj opremi NN 79/2016, te na temelju toga se moraju uzeti mnogobrojni projektni podaci u obzir poput onih danih u tablici 9.

**Tablica 9. Projektni podaci za isparivač UNO-1800 [20]**

|   |  |              |            |
|---|--|--------------|------------|
| Standard:                                   | EN 13445 + N.N 79/16   |              |            |
| Projektni tlak:                             | 16,5 bar (g)   |              |            |
| Ispitni tlak:                               | 27,17 bar (g)  |              |            |
| Projektna temperatura:                      | -10/100 °C   |              |            |
| Radni medij:                                | Plin   |              |            |
| Položaj posude tijekom rada / tlačne probe: | Vertikalno   |              |            |
| Ispitni medij:                              | Voda   |              |            |
| Gustoća ispitnog medija:                    | 1000 kg/m <sup>3</sup>   |              |            |
| Dodatak na koroziju:                        | c = 1,5 mm   |              |            |
| Masa tlačne posude:                         | Prazna   | Tlačna proba | Radna masa |
|   | 2800 kg  | 9600 kg      | 6500 kg    |
| Modul prema NN 79/2016:                     | G  |              |            |
| Opterećenje vjetrom:                        | 30 m/s   |              |            |
| Zona potresa:                               | 0,15 g   |              |            |
| Toplinska obrada:                           | Ne   |              |            |
| Toplinska izolacija:                        | Ne   |              |            |
| Koeficijent zavara plašta i kape / podnice: | Z=1  |              |            |
| Koeficijent zavara plašta i priključka:     | Z=1  |              |            |
| Antikorozivna zaštita:                      | Kategorija korozije odabrana prema standardu<br>HRN EN ISO 12944-5-2019. |              |            |

Proizvođač jamči da su standardi, pravilnici i norme korišteni u projektiranju i izradi posude u skladu s projektnim i radnim uvjetima te mehaničkim proračunom, čime se osigurava njezina sigurna i pouzdana upotreba.

### 7.2. Odabir materijala za izradu isparivača UNP-1800

Materijali moraju ispunjavati zahtjeve proračuna i biti potvrđeni odgovarajućim certifikatima i atestima propisanim za kategoriju opreme IV. Svaka cijev i ugradbeni element moraju biti sljedivi, a broj šarže i broj certifikata moraju biti navedeni na nacrtu ili posebnom obrascu. Tako se osigurava sustav kontrole kvalitete i poboljšava sigurnost tlačne opreme.

U tablici 10 prikazane su komponente isparivača, korišteni materijali za izradu te odgovarajuća norma prema kojoj su odabrani.

**Tablica 10. Komponente isparivača i odabrani materijali s odgovarajućim normama [20]**

| NAZIV                  | MATERIJAL        | NORMA              |
|------------------------|------------------|--------------------|
| Plajt                  | P265 GH          | HRN EN 10028       |
| Cijevna kapa / podnica | P265 GH          | DIN 28013          |
| Cijev priključka       | P265 GH          | HRN EN 10216       |
| Prirubnica             | P245             | HRN EN 1092        |
| Ojačanje               | P265 GH          | HRN EN 10028       |
| Lim                    | S235JR / P265 GH | HRN EN 10025/10028 |
| Natpisna pločica       | AISI 304         | ASME II            |

Pri projektiranju i odabiru materijala, a kasnije pri izradi i održavanju tlačne opreme treba paziti na sve zahtjeve navedene u teorijskom dijelu ovog rada, jer tako se osigurava tražena sigurnost i kvaliteta proizvoda.

### 7.3. Bitni sigurnosni zahtjevi pri izradi isparivača UNP-1800

U skladu s Pravilnikom o tlačnoj opremi (NN 79/2016), u tablici 11 prikazani su bitni sigurnosni zahtjevi koji se moraju poštovati prilikom čitave proizvodnje isparivača UNP-1800.

Tablica 11. Bitni sigurnosni zahtjevi pri izradi isparivača UNP-1800 [20]

| Br.       | Bitni sigurnosni zahtjevi  | Sukladnost s Pravilnikom o tlačnoj opremi NN 79/2016  |
|-----------|--|---|
| <b>1.</b> | <b>Opća pravila</b>  |   |
| 1.1.      | Tlačna oprema je konstruirana tako da osigurava sigurnost kod postavljanja, korištenja i održavanja, u skladu s uputama proizvođača.   | Posuda je konstruirana prema dokumentaciji u skladu sa standardom EN 13445 te Pravilnikom o tlačnoj opremi NN 79/2016.  |
| 1.2.      | Proizvođač mora eliminirati ili smanjiti opasnosti, primijeniti odgovarajuće zaštitne mjere i informirati korisnika o mogućim opasnostima.   | Posuda je konstruirana sukladno hrvatskoj regulativi te je izvršena analiza rizika.   |
| 1.3.      | Oprema mora biti konstruirana kako bi se spriječila opasnosti koje mogu nastati zbog nepravilne uporabe.   | Upute za rad su navedene u ovoj dokumentaciji (poglavlje 4.).   |
| <b>2.</b> | <b>Konstrukcija</b>  |   |
| 2.1.      | Tlačna oprema mora biti konstruirana tako da su uzeti u obzir svi relevantni faktori sigurnosti, kako bi ona bila sigurna u svom životnom vijeku.  | Oprema je konstruirana koristeći faktore sigurnosti koje obvezuju Pravilnik o tlačnoj opremi NN 79/2016 i standard EN 13445.  |
| 2.2.      | Tlačna oprema mora biti konstruirana za sva opterećenja koja se mogu predvidjeti u radu:<br>-unutarnjeg / vanjskog tlak<br>-radne temperature i temperature okoline<br>-statička opterećenja vlastite težine i opterećenja kod tlačne probe<br>-transporta, vjetra, potresa<br>-reakcije podloge<br>-korozije<br>-nestabilnih fluida | Projektne tlakovi i temperature definirani su prema odgovarajućim tehničkim specifikacijama.<br>U proračunu su kontrolirana naprezanja od unutarnjeg tlaka, vlastite težine, potresa i opterećenja kod tlačne probe.<br>Dodatak na koroziju je $c = 1,5 \text{ mm}$ . |
| 2.2.1.    | Konstrukcija na odgovarajuću čvrstoću mora se temeljiti na proračunu i po potrebi eksperimentu.  | Proračun je rađen prema standardu EN 13445-3  |
| 2.2.2.    | Proračun putem formula.  | Formule dane u poglavljima primijenjenih tehničkih specifikacija.   |
| 2.2.3.    | Eksperiment.   | Nije potreban jer su formule opće prihvaćene.   |
| 2.3.      | Mjere za sigurno rukovanje i rad.  | U dokumentaciji navedene upute za montažu, korištenje i održavanje (poglavlje 4.).  |
| 2.4.      | Pregledi i ispitivanja.  | Navedeno u dokumentaciji (poglavlje 4.).  |

| Br.       | Bitni sigurnosni zahtjevi  | Sukladnost s Pravilnikom o tlačnoj opremi NN 79/2016   |
|-----------|--|--|
|           | Oprema mora biti konstruirana tako da se omoguće unutarnji i vanjski pregledi.                     |  |
| 2.5.      | Drenaža i odzračivanje.  | Navedeno u nacrtu.   |
| 2.6.      | Korozija i kemijski utjecaji sadržaja.   | U dokumentaciji naveden dodatak na koroziju<br>c = 1,5 mm                                      |
| 2.7.      | Abrazija.  | Nije posebno navedena.   |
| 2.8.      | Sklop je tako izrađen da su komponente odgovarajuće pripremljene, izrađene i sklopljene / spojene. | Da.  |
| 2.9.      | Upute za punjenje i pražnjenje.  | U sklopu uputa za montažu, korištenje i održavanje (poglavlje 4.).                             |
| 2.10.     | Zaštita od prekoračenja graničnih vrijednosti tlaka.   | PSV.   |
| 2.11.     | Sigurnosni pribor.<br>Graničnici tlaka / temperature.  | PSV.   |
| 2.12.     | Vanjski požar.   | Štićeno vanjskim sustavom korisnika.   |
| <b>3.</b> | <b>Proizvodnja</b>   |  |
| 3.1.      | Procedure kojima se u proizvodnji osigurava ispravnost konstrukcije.                               | Prema uputama proizvođača.   |
| 3.1.1.    | Priprema pozicija.   | Prema uputama proizvođača.   |
| 3.1.2.    | Zavareni spojevi.  | Prema uputama proizvođača.   |
| 3.1.3.    | Ispitivanja bez razaranja (NDT).   | Procedura NDT-a naznačena u dokumentaciji.   |
| 3.1.4.    | Toplinska obrada.  | Ne.  |
| 3.1.5.    | Sljednost materijala.  | Prema uputama proizvođača.   |
| 3.2.      | Konačno prihvaćanje.   |  |
| 3.3.      | Označavanje.   | Prema uputama proizvođača.   |
| 3.4.      | Upute za rad.  | Nalazi se u dokumentaciji (poglavlje 4.)   |
| <b>4.</b> | <b>Materijali</b>  |  |
| 4.1.      | Materijali za tlačnu opremu moraju zadovoljiti ispitivanja i radne parametre.                      | Korišteni su materijali prema ASME i EN standardima te Pravilniku o tlačnoj opremi NN 79/2016. |
| 4.2.      | Materijali moraju zadovoljiti zahtjevima u proračunu.  | Zadovoljavaju.   |
| 4.3.      | Materijali moraju biti potvrđeni odgovarajućim certifikatima koji se traže za kategoriju opreme    | PMA ili dvostruki atesti.  |
| <b>5.</b> | <b>Ložena ili na drugi način grijana oprema</b>  | Ne.  |
| <b>6.</b> | <b>Cjevovodi</b>   | Ne.  |
| <b>7.</b> | <b>Posebni kvantitativni zahtjevi</b>  |  |

| Br.  | Bitni sigurnosni zahtjevi          | Sukladnost s Pravilnikom o tlačnoj opremi NN 79/2016   |
|------|------------------------------------|--|
| 7.1. | Dopuštena naprezanja.              | Naprezanja u komponentama zadovoljavaju zahtjevima primijenjenih tehničkih specifikacija.            |
| 7.2. | Koeficijenti zavarenog spoja.      | Odabrani prema primijenjenim tehničkim specifikacijama.  |
| 7.3. | Ograničenje tlaka.                 | Ventili sigurnosti i sigurnosni uređaji nisu u ovoj dokumentaciji.                                   |
| 7.4. | Tlačna proba vodom.                | Priložena dokumentacija po kojoj će se tlačna proba provoditi u radionici i na montaži (gradilištu). |
| 7.5. | Karakteristike materijala gradnje. | Vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja odgovaraju traženim zahtjevima.                    |

#### 7.4. Analiza rizika

Također je važno provesti analizu svih mogućih rizika koji se mogu pojaviti tijekom izrade, montaže, eksploatacije i upotrebe tlačne opreme. Na temelju te analize sastavlja se cjeloviti prikaz mogućih rizika, koji su detaljno opisani u tablici 12. U tablici su navedeni uzroci opasnosti, njihove moguće posljedice te ukupni rizik koji mogu predstavljati, kako za funkcionalnost same opreme, tako i za okolinu u kojoj se nalazi. Također su predložene mjere za smanjenje tih rizika i njihovo učinkovito upravljanje.

**Tablica 12. Analiza rizika: uzroci, posljedice i mjere zaštite [20]**

| Br. | Slučaj - uzrok opasnosti    | Učinak - posljedice  | Rizik - opasnost   | Rješenje problema - zaštita   |
|-----|-----------------------------|--|--|---|
| 1.  | Povećanje unutarnjeg tlaka  | -izazvana naprezanja prelaze maksimalna dopuštena naprezanja<br>-nenormalne promjene oblika<br>-naprezanja / deformacije uzrok mogućeg sloma | -slom materijala<br>-slom opreme                         | -posuda je proračunata na maksimalni tlak koji se može pojaviti<br>-za posudu je predviđen sigurnosni ventil na sustavu cjevovoda |
| 2.  | Vanjski projektni tlak      |  |  | -nema vanjskog tlaka  |
| 3.  | Temperatura okoline         | -moguće puzanje materijala<br>-slom materijala kod niskih temperatura  | -trajne deformacije tlačnih dijelova<br>-slom materijala | -kod odabira materijala uzeta u obzir temperatura okoline – impact test   |
| 4.  | Povećanje radne temperature | -moguće puzanje materijala<br>-slom materijala kod visokih temperatura   | -trajne deformacije tlačnih dijelova<br>-slom materijala | -kod odabira materijala uzeta u obzir maksimalna radna temperatura  |
| 5.  | Osjetljivost na krti lom    | -uzrokuje stvaranje pukotina   | -slom zavarenih spojeva i materijala                     | -odabir odgovarajućeg materijala  |
| 6.  | Vanjski požar               | -moguća opasnost za svojstva   | -slom materijala   | -odgovornost naručitelja  |



| Br. | Slučaj - uzrok opasnosti  | Učinak - posljedice   | Rizik - opasnost   | Rješenje problema - zaštita  |
|-----|---|---|--|--|
| 7.  | <b>Tlak visine stupca medija kod radnih i ispitnih uvjeta</b>   | -uzrokuje povećanje projektnog tlaka  | -nedovoljna debljina stijenke tlačnih dijelova<br>-moguće deformacije tlačnih dijelova | -uzeto u obzir u proračunu tlačnih dijelova  |
| 8.  | <b>Varijabilnost opterećenja</b>  | -uzrokuje povećanje projektnog tlaka na tlačnim dijelovima  | -nestabilnost opreme<br>-moguće deformacije dijelova opreme                            | -ne postoje varijabilna opterećenja  |
| 9.  | <b>Dinamički tlak fluida</b>  | -izaziva moguće vibracije i oscilacije  | -oštećenje opreme i konstrukcije   | -nema dinamičkih udara   |
| 10. | <b>Masa fluida za vrijeme radnih uvjeta</b>   | -povećava težinu opreme   | -slom materijala   | -kod projektiranja uzeta je u obzir masa odnosno težina fluida za vrijeme rada   |
| 11. | <b>Masa fluida za vrijeme ispitnih uvjeta</b>   | -povećava ukupnu težinu opreme  | -slom materijala   | -kod projektiranja je uzeta u obzir masa odnosno težina vode za vrijeme tlačne probe   |
| 12. | <b>Naprezanja zbog opterećenja vjetra</b>   | -moguće vibracije i oscilacije opreme i konstrukcije  | -oštećenje opreme i konstrukcije   | -posuda nema oslonaca  |
| 13. | <b>Opterećenje od snijega i leda</b>  | -moguće vibracije i oscilacije opreme i konstrukcije  | -oštećenje opreme i konstrukcije   | -pravilno čišćenje posude<br>odgovornost je naručitelja  |
| 14. | <b>Opterećenje od potresa</b>   | -moguće vibracije i oscilacije opreme   | -oštećenje opreme i konstrukcije   | -posuda nema oslonaca  |
| 15. | <b>Sile i momenti od priključenih cjevovoda</b>   | -uzrokuje naprezanja koja prelaze maksimalno dopušteno naprezanje<br>-nenormalno promjene oblika<br>-naprezanja / deformacije uzrok sloma   | -trajne deformacije opreme   | -cjevovod projektiran tako da nema prenošenja sila i momenata  |
| 16. | <b>Sile i momenti zbog oslonaca i/ili nosača na opremi</b>  | -uzrokuje naprezanja koja prelaze maksimalno dopušteno naprezanje<br>-nenormalne promjene oblika<br>-naprezanja / deformacije uzrok sloma   | -trajne deformacije opreme   | -analizom naprezanja oslonaca / nosača spriječiti prekoračenje maksimalno dopuštenih sila, momenata, naprezanja i pomaka dijelova opreme |
| 17. | <b>Korozija:<br/>-unutarnja korozija<br/>-vanjska korozija</b>  |   | -oštećenje unutarnjih površina<br>-oštećenje vanjskih površina                         | -predviđena antikorozivna zaštita (AKZ)  |
| 18. | <b>Erozija:<br/>-turbulencije<br/>-vrtloženje</b>   | -nagrizanje materijala erozijom   | -oštećenje unutarnjih površina   | -u posudi nema turbulencija i vrtloženja   |
| 19. | <b>Uvjeti zamora materijala:<br/>-kolebanje tlaka stalno i/ili cikličko<br/>-vibracije cjevovoda ili mješavine<br/>-pumpe / kompresori<br/>-kolebanje temperature</b> | -uzorkuju naprezanja koja prelaze maksimalno dopuštene vrijednosti naprezanja<br>-uzrokuju broj ciklusa koji prelazi dopušteni broj ciklusa | -trajne deformacije<br>-slom materijala  | -nema uvjeta koji uzrokuju zamor materijala  |
| 20. | <b>Osjetljivost na kemijsko nagrizanje</b>  | -uzrokuje koroziju materijala i stanjenje debljine stijenke   | -slom zavarenih spojeva i materijala   | -predviđen fluid grupe 1 te dodatak na koroziju  |

| Br. | Slučaj - uzrok opasnosti                              | Učinak - posljedice  | Rizik - opasnost  | Rješenje problema - zaštita                           |
|-----|---|--|---|---|
| 21. | Razgradnja nestabilnih fluida                         | -uzrokuje povećanje tlaka                                  | -nestabilnost opreme<br>-moguće deformacije dijelova opreme   | -nije primjenjivo                                     |
| 22. | Opterećenja kod transporta                            | -snažni dinamički udar kod pada zbog neispravnog rukovanja | -trajne deformacije opreme i/ili dijelova<br>-ljudska ozljeda | -striktno pridržavanje uputa za rukovanje i transport |
| 23. | Opasna akumulacija zapaljivih mješavina gorivih tvari | -zagađenje atmosfere<br>-požar<br>-eksplozija              | -opasnost za ljude<br>-opasnost za materijal / konstrukciju   | -nema opasnosti                                       |
| 24. | Nekontrolirane kemijske reakcije                      | -uzrokuju koroziju materijala                              | -slom konstrukcije  | -ne primjenjuje se                                    |
| 25. | Nekontrolirano prepunjavanje procesnog fluida         | -oštećenje dijelova opreme                                 | -opasnost za ljude<br>-opasnost za konstrukciju               | -ne primjenjuje se                                    |
| 26. | Rizik od vatre  | -oštećenje dijelova opreme                                 | -opasnost za ljude<br>-opasnost za okoliš                     | -ne primjenjuje se                                    |

Tlačna oprema smije biti stavljena na tržište i u uporabu samo ako ne predstavlja rizik za zdravlje i sigurnost ljudi. Stoga je nužna detaljna analiza mogućih opasnosti i njihovih uzroka te predlaganje učinkovitih rješenja kako bi se osigurala viša razina sigurnosti proizvoda.

#### 7.4.1. Potrebni priključci na isparivač UNP-1800

Upravo zbog mnogobrojnih sigurnosnih zahtjeva koji se uzimaju u obzir, da bi isparivač bio u potpunosti funkcionalan i siguran za korištenje i održavanje uz osnovne komponente od kojih se sastoji, potrebni su razni priključci koji su sa svojim oznakama navedeni u tablici 13.

Tablica 13. Priklučci na isparivaču UNP-1800 [20]

| Oznaka | Opis            | Kom | Priključak |                        | Prirubnica            |       |      |
|--------|-----------------|-----|------------|------------------------|-----------------------|-------|------|
|        |                 |     | NPS / DN   | Debljina stijenke [mm] | Tip                   | Klasa | Lice |
| N1     | Ulaz plina      | 1   | DN25       | 4                      | WN                    | PN25  | RF   |
| N2     | Izlaz plina     | 1   | DN50       | 4,5                    | 2" NPT                |       |      |
| N3     | Drenaža         | 1   | DN25       | 4                      | 1" NPT                |       |      |
| N4a,b  | Ulaz/izlaz vode | 2   | DN50       | 4,5                    | 2" NPT                |       |      |
| N5     | PSV             | 1   | DN25       | 4                      | 1" NPT                |       |      |
| N6     | Manometar       | 1   | ¾" NPT     |                        | Threadolet class 3000 |       |      |
| N7     | Termometar      | 1   | ¾" NPT     |                        | Threadolet class 3000 |       |      |
| LT     | Pokazivač nivoa | 3   | ¾" NPT     |                        | Threadolet class 3000 |       |      |
| M1     | Ulaz čovjeka    | 1   | DN500      |                        | WN                    | PN25  | RF   |

### 7.5. Zavarivanje isparivača UNO-1800

Svi postupci zavarivanja moraju biti odobreni od strane nadzornog inženjera investitora prije početka izvođenja radova. Zavarivanje nije dopušteno prije službenog odobrenja specifikacije postupka zavarivanja (WPS). Svi zavari izvedeni prije pregleda i odobrenja nadzornog inženjera smatraju se neprihvatljivima.

Podaci navedeni u atestaciji postupka zavarivanja, uključujući vrijednosti struje, napona, brzine zavarivanja te vremena i temperature toplinske obrade, moraju biti točni i izmjereni s pomoću kalibriranih instrumenata, čime se osigurava pouzdanost i ponovljivost procesa.

#### 7.5.1. Odabrani postupci zavarivanja

Na temelju analiza provedenih u teorijskom dijelu rada, tijekom zavarivanja isparivača UNP-1800 primijenjeni su sljedeći postupci zavarivanja: REL, TIG i kombinacija REL + TIG, pri čemu je izbor metode ovisio o položaju zavara, tehničkim zahtjevima te debljini materijala.

Zavarivanje ovakve vrste opreme mora se provoditi isključivo prema postupcima definiranim u specifikacijama postupka zavarivanja (WPS-u), koje izrađuje tehnolog, dok nadzor nad primjenom provodi inženjer za zavarivanje. Svaki primijenjeni postupak mora biti atestiran i potvrđen odgovarajućim atestom postupka zavarivanja (WPAR-om).

Budući da se tijekom izrade koristi više različitih postupaka zavarivanja te da je isparivač izrađen od brojnih konstrukcijskih elemenata, nužno je izraditi listu korištenih WPS-ova te prateće atestacije postupaka zavarivanja (WPAR-ove). Lista primijenjenih WPS-ova prikazana je na slici 16, s nekim osnovnim podacima, dok je realan primjer WPS-a, sa svim relevantnim parametrima i uputama za provedbu postupka zavarivanja, prikazan na slici 17.

| RB No. | SPZ br. WPS No. | Postupak zavarivanja Welding Process | Tip spoja Joint Type | Pozicija Position | Osnovni mat. Parent mat. | Nazivni promjer Nominal dia.     |   | Debljina Thickness                         |                                | Atest postupka WPAR | Napomena/Remark                               |
|--------|-----------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------------|---|--|--------------------------------|---------------------|---|
|        |                 |                                      |                      |                   |                          | Od From                          | Do To   | Od From                                    | Do To                          |                     |   |
| 01     | 99/23_r2        | 141 TIG                              | BW                   | PH                | 1.1/1.1                  | 33,7 mm                          | -   | 4,0 mm                                     | 5,0 mm                         | CP-540-13           | žica 3,2 mm                                   |
| 02     | 102/23_r0       | 141 TIG                              | FW                   | PH                | 1.1/1.1                  | 33,4-60,3 mm<br>Prijelazna cijev | >114,3 mm<br>Lim                                      | 2,6-5,54 mm<br>Prijelazna cijev            | 6,0-15,0 mm<br>Lim             | CP-541-13           | Skošnje priključne cijevi                     |
| 03     | 107/23_r1       | 141 TIG+<br>111 REL                  | BW                   | PH/PC             | 1.1/11.1                 | 1/2"-3/4"<br>Threadolet          | 219,1-1220,0 mm<br>cijev                              | -<br>Threadolet                            | 6,0-12,0 mm<br>cijev           | CP-563-13           | -   |
| 04     | 111/23_r1       | 141 TIG                              | FW                   | PH                | 1.1/1.1                  | <1800 mm<br>Podnica / Lim plašta | 21,3-48,3 mm<br>Prijelazna cijev                      | 10,0-12,0 mm<br>Podnica / Lim<br>plašta    | 4,0-5,0 mm<br>Prijelazna cijev | CP-541-13           | -   |
| 05     | 113/23_r0       | 111 REL                              | FW                   | PH                | 1.1/1.1                  | 761,5-799,8 mm<br>Lim ojačanje   | 508,0 mm<br>Limena cijev<br>1220-1800 mm<br>Isparivač | 10,0-12 mm<br>Lim ojačanja<br>i isparivača | 16,0 mm<br>Limena<br>cijev     | CP-564-13           | Ubod cijevi u isparivač sa dodatnim ojačanjem |
| 06     | 114/23_r2       | 141 TIG+<br>111 REL                  | BW                   | H-L045            | 1.1                      | 1120 mm                          | 1800 mm   | 10,0 mm                                    | 12,0 mm                        | CP-563-13           | -   |
|        |                 |                                      |                      |                   |                          |                                  |   |  |                                |                     |   |
|        |                 |                                      |                      |                   |                          |                                  |   |  |                                |                     |   |
|        |                 |                                      |                      |                   |                          |                                  |   |  |                                |                     |   |

**Slika 16. Lista WPS-ova korištenih pri proizvodnji isparivača UNP-1800 [20]**

Lista sadrži osnovne podatke o svim korištenim WPS-ovima tijekom proizvodnje isparivača UNP-1800. Na priloženoj slici jasno je prikazano koji WPS se primjenjuje za određene parametre, uključujući:

- Postupak zavarivanja,
- Tip spoja,
- Poziciju zavara,
- Osnovni materijal,
- Vrstu, dimenzije i debljinu materijala.

Također, navedeni su i odgovarajući atesti postupaka zavarivanja (WPAR-ovi), kojima je potvrđena valjanost pojedinih WPS-ova.

| macel plin   |  | <b>SPZ</b><br><b>SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA</b><br><b>WPS</b><br><b>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION</b><br>HRN EN ISO 15609 |  | Samoborska cesta 16, 10090 Zagreb<br>Telefon: +385 1 3484 441<br>Fax: +385 1 3484 455<br>e-mail: info@macel-plin.hr<br>Web: www@macel-plin.hr |  |  |  |  |  |
|--|--|---|--|---|--|--|--|--|--|
| Projekt<br>Project   |  | SPZ broj / WPS No.:   | 113/23_r0  |   |  |  |  |  |  |
| Broj nacrt<br>Drawing No.  |  | Odgovarajući etest postupka<br>Supporting WPAR  | CP-584-13  |   |  |  |  |  |  |
| Način pripreme spoja i čišćenje<br>Joint preparation and cleaning                | Tokarenja/Brusenje   | Postupak zavarivanja<br>Welding process   | 111 (HRN EN ISO 4063) REL  |   |  |  |  |  |  |
| Specifikacija osnovnog materijala<br>Parent material specification               | S355 / ASTM A106 Grade B   | Grupa materijala<br>Material group  | 1.1/1.1 (HRN EN ISO/CTR 15608)   |   |  |  |  |  |  |
| Vanjski promjer mm<br>Outside diameter mm  | Lim ojačanje Ø 761,5-799,8<br>Limena cijev DN 500<br>Isparivač Ø 1120-1800 | Tip spoja<br>Joint type   | Kutni a5 spoj lima ojačanja i isparivača<br>Kutni a7 spoj limene cijevi i isparivačasterepa<br>(HRN EN ISO 2553) |   |  |  |  |  |  |
| Debljina materijala mm<br>Material thickness mm                                  | Lim ojačanja i isparivača s= s2=10-12<br>Limena cijev s1=16                | Pozicija zavarivanja<br>Welding position  | PH (HRN EN ISO 6947)   |   |  |  |  |  |  |
| Priprema spoja / Joint preparation   |  |   | Tehnika zavarivanja / Welding technique  |   |  |  |  |  |  |
|  |  |   |  |   |  |  |  |  |  |
| Prolaz<br>Br.<br>Run No  | Postupak<br>Welding<br>process   | Promjer<br>dodatnog<br>materijala<br>Size of filler $\phi$  | Vrsta dodatnog<br>materijala<br>Type of filler   | Struja<br>Current<br>(A)  | Napon<br>Voltage<br>(V)  | Tip struje i<br>polaritet<br>Current and<br>polarity | Protok plina<br>Gas flow rate<br>(l/min) | Brzina<br>zavarivanja<br>Welding speed<br>(cm/min) | Linearna<br>energija<br>Heat input<br>(cm/min) |
| 1  | 111  | 2,5 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 60-80   | 24-26  | DC (+)   | -  | 10-12  | 9,2  |
| 2  | 111  | 2,5 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 90-100  | 24-26  | DC (+)   | -  | 11-13  | 9,4  |
| n  | 111  | 3,2 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 115-125   | 24-26  | DC (+)   | -  | 13-15  | 10,2   |
| n+1  | 111  | 3,2 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 115-125   | 24-26  | DC (+)   | -  | 13-15  | 10,2   |
| 1a   | 111  | 2,5 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 90-100  | 24-26  | DC (+)   | -  | 11-13  | 9,4  |
| 2a+n   | 111  | 3,2 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 115-125   | 24-26  | DC (+)   | -  | 13-15  | 10,2   |
| 1b+n   | 111  | 3,2 mm  | E 42 4 B 42 H5   | 115-125   | 24-26  | DC (+)   | -  | 12-14  | 11,0   |
| Detalji tehnike zavarivanja / Welding technique details                          |  |   | Dodatni i Pomoćni materijal / Consumable and auxiliary material  |   |  |  |  |  |  |
| Tehnika nihanja (max. širina nihanja):<br>Weaving technique (max. width of run): |  |   | 1,1 te stoji povlačenje, dalje nihanje do 5mm, 1b povlačenje   |   | Proizvođač i trgovački naziv:<br>Manufacturer and trade name:          |  | EZ 50B ili sličan                        |  |  |
| Čišćenje zavera:<br>Weld cleaning:   |  |   | Čišćenje / Brusenje n+1 spoja za ojačanje / Brusenje u korjeru zavera 1. prolaza unutar spoja                    |   | Oznaka prema normi:<br>Marking according name:                         |  | EN ISO 2560-A: E 42 4 B 42 H5            |  |  |
| Detalji o impulsima:<br>Impulse detail:  |  |   | -  |   | Tip obloga:<br>Coating type:   |  | Bazična                                  |  |  |
| Nagib pištolja:<br>Angle of gun:   |  |   | 5-10° u smjeru zavarivanja   |   | Zaštitni prašak:<br>Shielding flux:                                    |  | -  |  |  |
| Tehnika rada:<br>Welding technique:  |  |   | Dezna – luk prethodi žici  |   | Volframova elektroda: Tip/Promjer<br>Tungsten electrode: Type/Diameter |  | -  |  |  |
| Način obrade korjerna / Podloška:<br>Detail of back gouging / Backing:           |  |   | -  |   | Sušenje dodatnog materijala<br>Consumable drying                       |  | 2h/300°C (po potrebi)                    |  |  |
| Temperatura predgrijavanja:<br>Preheat temperature:                              |  |   | 20°C   |   | Zaštitni plin / Zaštita korjerna:<br>Shielding / Backing gas:          |  | -  |  |  |
| Međuprolazna temperatura:<br>Interpass temperature:                              |  |   | Max 200°C  |   | Protok plina zaštite korjerna:<br>Backing gas flow rate (l/min):       |  | -  |  |  |
| Ime i prezime / Name   |  |   |  |   | Odobrio / Approved   |  | Klijent / Client                         |  |  |
| Datum / Date   |  |   | 19.09.2023.  |   |  |  |  |  |  |
| Potpis i Pečat / Signature & Stamp   |  |   |  |   |  |  |  |  |  |

OB 05 17

Slika 17. Primjer WPS-a za zavarivanje ojačanja kod isparivača UNP-1800 [20]

Sukladno svim definiranim pravilima i parametrima zavarivanja, postupak zavarivanja komponenti tlačne opreme, smije izvoditi isključivo atestirani zavarivač.

#### **7.5.1.1. Atestirani zavarivači**

Svi zavarivači moraju posjedovati važeći atest koji potvrđuje njihovu kvalificiranost za zavarivanje određenih materijala, debljina i promjera koji se koriste za izradu tlačne opreme.

Svaki zavarivač obvezan je označiti izvedeni zavar vlastitom identifikacijskom oznakom, čime se omogućava njegova jednoznačna identifikacija.

Uz to, svi izvedeni zavari evidentiraju se u dnevniku zavarivanja, gdje se bilježi koji je zavarivač izveo određeni zavar. Ova evidencija omogućava sustavno praćenje i kontrolu kvalitete zavarenih spojeva te osigurava sljedivost tijekom cijelog postupka zavarivanja.

#### **7.5.2. Dodatni material za zavarivanje**

Dodatni materijali za zavarivanje moraju biti u skladu s odgovarajućim standardima, kao što su HRN EN ili ASME, te posjedovati valjanu certifikacijsku dokumentaciju prema normi HRN EN 10204. Certifikat dodatnog materijala dostavlja se kao sastavni dio završne tehničke dokumentacije.

Odabir dodatnog materijala temelji se na svojstvima osnovnog materijala i uvjetima eksploatacije. Sav potrošni materijal mora biti jednoznačno identificiran oznakom vrste i šarže proizvoda od strane odabranog proizvođača, kako bi se osigurala sljedivost tijekom cijelog postupka zavarivanja. Ovi podaci dokumentiraju se u obliku liste dodatnog materijala, koju je proizvođač obvezan izraditi. Primjer liste dodatnog materijala, prikazan je na slici 18.

Tijekom postupka zavarivanja isparivača UNP-1800 korištene su REL bazične elektrode promjera 3,2 mm i 2,5 mm, kao i puna žica za TIG zavarivanje promjera 2,4 mm i 3,2 mm, kao što je i evidentirano u listi dodatnog materijala.

| Odnosi se na/<br>Relates to: | Projekt<br>Project | Dio projekta<br>Part of Project | Osnovni materijal<br>Parent material | Dodatni materijal<br>Filler material  | Boja<br>Paint                                    | Ostalo<br>Other   |
|------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|
| Specifikacija/Specification: |                    | Napomena/Note:                  |                                      |                                       |  |                   |
| Crtež br./Dwg. No.:          |                    | Izm./Rev.:                      |                                      | Sklop/pozicija/Part:                  |  |                   |
| #                            | Pozicija<br>Item   | Kvaliteta<br>Quality            | Šarža<br>Heat No.                    | Br. certifikata<br>Certificate<br>No. | Isporučitelj materijala<br>Supplier of material: | Napomena<br>Note: |
| 01                           | Puna žica 2,4 mm   | W 42 3 W4Si1                    | 18013                                | 1010827IF                             | ALUNOX WSG 3                                     | -                 |
| 02                           | Puna žica 3,2 mm   | W46 5 4Si1                      | PVX2310732                           | EC27294348                            | ESAB, OK Tigrod 12.64                            | -                 |
| 03                           | Elektroda 2,5 mm   | E 42 4 B 42 H5                  | SBX1410111                           | EC27152108                            | ESAB, OK 48.60                                   | -                 |
| 04                           | Elektroda 3,2 mm   | E 42 4 B 42 H5                  | SFX0512440                           | EC27050692                            | ESAB, OK 48.60                                   | -                 |
| 05                           | Puna žica 2,4 mm   | W 42 3 W3Si1                    | 2204506                              | 001316                                | EZ-TIG SG2                                       | -                 |
|                              |                    |                                 |                                      |                                       |  |                   |

**Slika 18. Lista dodatnog materijala za zavarivanje isparivača UNP-1800 [20]**

Uz pravilno odabrane materijale, odgovarajuću tehnologiju zavarivanja i precizno definirane parametre procesa, kontinuirana i sustavna kontrola kvalitete izrade te prateće dokumentacije od presudne su važnosti za osiguranje kvalitete i sigurnosti tlačne opreme. Kao što je navedeno u teorijskom dijelu rada, dosljedna primjena ovih mjera ključna je za postizanje visokih zahtjeva na sigurnost tlačne opreme. Stoga je potrebno izraditi plan kontrole kvalitete.

### 7.6. Plan kontrole kvalitete

Plan kontrole kvalitete, ima za cilj osigurati sve potrebne preuvjete za izradu, montažu i ispitivanje tlačnih posuda u skladu s važećim zakonima i propisima, kako bi se zajamčila njihova kvaliteta, sigurnost i funkcionalnost tijekom upotrebe. U njegovu izradu, prema potrebi, uključeni su voditelji kontrole kvalitete, projekata, proizvodnje ili montaže, tehnolozi, inženjeri zavarivanja te predstavnik uprave za sustav upravljanja kvalitetom.

Plan kontrole kvalitete za svaki proizvod, objekt ili građevinu izrađuje se prije početka proizvodnje, uzimajući u obzir ugovorne zahtjeve, relevantne dokumente i važeće propise za određenu vrstu proizvoda. Zbog prevelikog opsega sadržaja, na slikama 19 i 20 prikazan je samo dio plana kontrole kvalitete za isparivač UNP-1800, koji sadrži pregled aktivnosti, predmeta kontrole, odgovornih osoba te potvrda o provedenim kontrolama i ispitivanjima. Planovi kontrole temelje se na zakonima, propisima, normama, ugovorenim specifikacijama i internim zahtjevima za kvalitetu.

| Rbr. No  | Naziv aktivnosti ili dijela<br>Activity or component                  | Vrsta i opseg ispitivanja <sup>1)</sup><br>Type & quantum of check | Standard, Ispitne podloge<br>Standard, Code              | 2)         | 3)  | 4)     | 5)               | Vrsta izvješća<br>Type of Q record | Ovjera <sup>6)</sup><br>Confirmation<br>MACEL<br>PLIN | Ovjera <sup>7)</sup><br>Confirmation<br>TOS | Ovjera <sup>8)</sup><br>Confirmation<br>NADZOR | Ovjera <sup>9)</sup><br>Confirmation<br>Vetropack<br>Straža d.d. |
|----------|---|--|--|------------|-----|--------|------------------|------------------------------------|---|---|--|--|
|          |   |  |  | MACEL PLIN | TOS | NADZOR | VETROPACK STRAŽA |                                    |   |   |  |  |
| <b>1</b> | <b>KONTROLA PRIJE POČETKA IZRADE<br/>INSPECTION BEFORE PRODUCTION</b> |  |  |            |     |        |                  |                                    |   |   |  |  |
| 1.1      | Odobrena dokumentacija  |  |  |            |     |        |                  |                                    |   |   |  |  |
| 1.1.1    | Kontrola projektne i radioničke dokumentacije                         | REV  | PED 2014/68/EU<br>ASME VIII Div.1+NN 79/16<br>EN 13445-3 | X          | R   |        |                  | Dokument                           |   |   |  |  |
| 1.1.2    | Certifikat sustava upravljanja kvalitetom                             | REV  | ISO 9001   | X          | R   |        |                  | Certifikat                         |   |   |  |  |
| 1.1.3    | Certifikat pogona za izvođenje zavarivačkih radova                    | REV  | HRN EN ISO 3834-2  | X          | R   |        |                  | Certifikat                         |   |   |  |  |
| 1.1.4    | IWE/EWE certifikati   | REV  | EN ISO 14731   | X          | R   |        |                  | Certifikat                         |   |   |  |  |
| 1.1.5    | Lista zavarivača sa certifikatima                                     | REV  | HRN EN ISO 9606-1  | X          | R   |        |                  | Certifikat                         |   |   |  |  |
| 1.1.6    | Lista materijala sa certifikatima                                     | REV  | HRN EN 10204   | X          | R   |        |                  | Certifikati                        |   |   |  |  |

Slika 19. Prvi dio plana kontrole kvalitete, prije početka izrade [20]

| Rbr. No | Naziv aktivnosti ili dijela<br>Activity or component | Vrsta i opseg ispitivanja <sup>1)</sup><br>Type & quantum of check | Standard, Ispitne podloge<br>Standard, Code | 2)         | 3)  | 4)     | 5)               | Vrsta izvješća<br>Type of Q record | Ovjera <sup>6)</sup><br>Confirmation<br>MACEL<br>PLIN | Ovjera <sup>7)</sup><br>Confirmation<br>TOS | Ovjera <sup>8)</sup><br>Confirmation<br>NADZOR | Ovjera <sup>9)</sup><br>Confirmation<br>Vetropack<br>Straža d.d. |
|---------|--|--|---|------------|-----|--------|------------------|------------------------------------|---|---|--|--|
|         |  |  |   | MACEL PLIN | TOS | NADZOR | VETROPACK STRAŽA |                                    |   |   |  |  |
| 1.1.7   | Lista dodatnih materijala sa certifikatima           | REV  | HRN EN 10204                                | X          | R   |        |                  | Certifikati                        |   |   |  |  |
| 1.1.8   | Lista materijala prema sa certifikatima              | REV  | Certifikati proizvođača                     | X          | R   |        |                  | Certifikati                        |   |   |  |  |
| 1.1.9   | Lista procedura zavarivanja WPAR                     | REV  | EN ISO 15614-1                              | X          | R   |        |                  | WPQR                               |   |   |  |  |
| 1.1.10  | Lista postupaka zavarivanja WPS                      | REV  | EN ISO 15609-1                              | X          | R   |        |                  | WPS                                |   |   |  |  |
| 1.2.    | <b>Tehnologije i procedure</b>                       |  |   |            |     |        |                  |                                    |   |   |  |  |
| 1.2.1   | Tehnologija zavarivanja                              | TU   | Projekt                                     | X          | R   |        |                  | Postupak/<br>Radna uputa           |   |   |  |  |
| 1.2.2   | Tehnologija montaže                                  | TU   | Projekt                                     | X          | R   |        |                  | Postupak/<br>Radna uputa           |   |   |  |  |
| 1.2.3   | Tehnologija antikoroziivne zaštite                   | TU   | Projekt                                     | R          | R   |        |                  | Postupak/<br>Radna uputa           |   |   |  |  |

Slika 20. Drugi dio plana kontrole kvalitete, prije početka izrade [20]

Kratice na slikama jasno označavaju što je potrebno napraviti za određeni korak kontrole kvalitete, a znače sljedeće:

- REV- Pregled dokumenata
- TU - Tehnološki postupak izrade
- R - pregled dokumenata
- X - provedba (izvršenje)

Čitavi postupak plana kontrole kvalitete se prilaže u sklopu cjelovite dokumentacije izrađene za isparivač UNP-1800.



### 7.6.1. Kontrola kvalitete zavarenih spojeva

Kao što je rečeno u teorijskom dijelu rada, najprikladnije metode kontrole kvalitete zavarenih spojeva su nerazorne metode ispitivanja. Ispitivanje zavarenih spojeva nerazornim metodama za konačno odobrenje mora biti provedeno u skladu s primjenjivim normama. Izvođač radova može, prema potrebi, provesti dodatna nerazorna ispitivanja prije postupka toplinske obrade kako bi otkrio i otklonio eventualne neprihvatljive nedostatke zavara. Površine, uključujući završni zavar, moraju biti glatko obrađene kako bi se osigurala odgovarajuća preciznost potrebna za pravilno provođenje nerazornog ispitivanja.

Ovisno o tipu zavarenih spojeva, primjenjivat će se različite metode ispitivanja, kao što je prikazano u tablici 14.

**Tablica 14. Vrsta i opseg nerazornih ispitivanja zavara (NDT) [20]**

| TIP ZAVARA                                | VRSTA I OBIM NDT |                                       |             |
|---|------------------|---------------------------------------|-------------|
|   | VT               | RT / UT                               | MT / PT     |
| Uzdužni zavar sučeon                      | 100%             | 100%                                  |             |
| Kružni zavar sučeon                       |                  | 100% di>150                           | 100% di<150 |
| Zavari fitinga                            |                  |                                       | SPOT        |
| Fitinzi i priključci                      |                  | M1-100%                               | 100%        |
| Zavari tlačnih i konstrukcijskih dijelova |                  |                                       | 100%        |
| VT – vizualno ispitivanje                 |                  | MT – ispitivanje magnetskim česticama |             |
| UT – ultrazvučno ispitivanje              |                  | PT – ispitivanje penetrantima         |             |
| RT – radiografsko ispitivanje             |                  |                                       |             |

Na kraju se radi izvještaj o nerazornom ispitivanju zavara, na temelju kojega se potvrđuje odluka, je li zavar prihvatljiv prema postavljenim zahtjevima ili nije.

Ispitivanja kontrole kvalitete se provode paralelno s izvođenjem radova, a osim zavara koji je inicijalno identificiran kao neispravan, dodatno se ispituju još dva reprezentativna zavara. Ako se utvrdi da su ti dodatni zavari bez nedostataka, neispravan zavar iz prvog ispitivanja mora biti popravljen ili ponovno izveden.

Međutim, ako jedan od dva dodatno ispitana zavara sadrži grešku, svi zavari koje je izveo taj zavarivač moraju biti:

- U potpunosti ispitani nerazornim metodama te prema potrebi popravljani
- Ili u cijelosti uklonjeni brušenjem i ponovno izvedeni, o trošku izvođača radova.

Ako nadzorni inženjer procijeni potrebnim, može tražiti dodatna ispitivanja kako bi se potvrdila ispravnost zavarenih spojeva. No to ovdje nije bio slučaj, te potvrđeno da su zavareni spojevi prihvatljivi prema postavljenim zahtjevima

### **7.7. Antikorozivna zaštita (AKZ)**

Provedba i nadzor antikorozivne zaštite moraju se provoditi u skladu sa svim zahtjevima projekta, a glavni cilj ove zaštite je osigurati zaštitu tlačne posude od korozije te produžiti njezin vijek trajanja.

Način izvođenja antikorozivne zaštite ovisi o vrsti primijenjene zaštite te se može podijeliti u sljedeće faze:

- Priprema površine
- Nanošenje temeljnog premaza
- Nanošenje završnog premaza


Prije nanošenja zaštitnih premaza, važno je da se sve površine odmašćuju, a zatim brišu i suše, čistim suhim krpama. Isparivač UNP-1800 je zaštićen sustavom zaštitnih premaza u tri sloja:

- Na prvi i drugi sloj nanesen je EPOXYKOLOR CH 400, koji je zapravo dvokomponentni epoksidni premaz, koji pruža visoku kemijsku i mehaničku otpornost te osigurava izvrsnu adheziju na metalnu podlogu.
- Kao završni sloj nanesen je 2K PURKOLOR, dvokomponentni poliuretanski premaz koji osigurava dodatnu zaštitu od atmosferskih utjecaja, UV zračenja i abrazije, čime se poboljšava trajnost i estetska postojanost površine.

Nakon nanošenja premaza, primijenjena antikorozivna zaštita podliježe ispitivanju, a nakon toga se potvrđuje je li izvedena u skladu sa zadanim zahtjevima.

## 7.8. Tlačna proba

Čitavi postupak provođenja tlačne probe na isparivaču UNP-1800, prikazan je na slici 21.

|   |  | <b>PRESSURE TEST REPORT</b><br><b>IZVJEŠTAJ O TLAČNOM ISPITIVANJU</b><br><b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU NEPROPUSNOSTI</b> |                                   | Report No.:        |
|--|--|---|-----------------------------------|--------------------|
|  |  |   |                                   | Izvještaj Br.:     |
|  |  |   |                                   | LH-13-24           |
| <b>Project:</b> Dobava i montaža stanice za opskrbu tvornice stlačenim prirodnim plinom i sintetičkim prirodnim plinom, puštanje u rad i dežurstvo |  |   |                                   |                    |
| <b>Projekt:</b>  |  | <b>Project No.:</b> MPL-23-00492  |                                   |                    |
| <b>Customer:</b> Vetropack Straža d.d.   |  | <b>Projekt broj:</b>  |                                   |                    |
| <b>Naručitelj:</b>   |  |   |                                   |                    |
| <b>System to be checked: / Sustav ispitivanja:</b>   |  |   |                                   |                    |
| <b>Equipment No.:</b><br><b>Oprema br.:</b>  | I-UNP-001/24<br>ISPARIVAČ UNP  | <b>Pipeline No.:</b><br><b>Cjevovod br.:</b>  |                                   |                    |
| <b>Category / Kategorija</b>   | IV   | <b>Module / Modul</b>   | G                                 |                    |
| <b>P &amp; I No. / P&amp;ID br.:</b>   |  | <b>Type of pipe / Tip cijevi</b>  | Šavna čelična cijev ( lim plašt ) |                    |
| <b>Pipe section:</b><br><b>Naziv cjevovoda:</b>  | Isparivač za UNP   |   |                                   |                    |
| <b>Measuring equipment:</b><br><b>Mjerni instrumenti:</b>  | 1.   | Wika pretvornik tlaka, 232.50.100 - tvornički broj: CA 083  |                                   |                    |
|  | 2.   | Termometar digitalni prikaz TECPEL, modul: DTM-318, sonda: tip K  |                                   |                    |
| <b>Testing equipment:</b><br><b>Ispitna oprema:</b>  | 1.   | Dvostupanjska vodena pumpa  |                                   |                    |
|  | 2.   |   |                                   |                    |
| <b>Operating data / Radni podaci:</b>  |  |   |                                   |                    |
| <b>Max. operating pressure [bar g]:</b><br><b>Maksimalni radni tlak [bar g]:</b>   | 16,5   | <b>Operating media:</b><br><b>Radni medij:</b>  | UNP                               |                    |
| <b>Test data / Ispitni podaci:</b>   |  |   |                                   |                    |
| <b>Test pressure [bar g]:</b><br><b>Ispitni tlak [bar g]:</b>  | 25   | <b>Test media:</b><br><b>Ispitni medij:</b>   | Voda                              |                    |
| <b>Start of test (date, time):</b><br><b>Početak ispitivanja (datum, vrijeme):</b>   | 03.12.2024.<br>13:15   | <b>End of testing (date, time):</b><br><b>Završetak ispitivanja (datum, vrijeme):</b>                                 | 03.12.2024.<br>13:45              |                    |
| <b>Start pressure [bar g]:</b><br><b>Početni tlak [bar g]:</b>   | 1. 25,1<br>2.  | <b>End pressure [bar g]:</b><br><b>Završni tlak [bar g]:</b>  | 1. 25,1<br>2.                     |                    |
| <b>Start temperature [°C]:</b><br><b>Početna temperatura [°C]:</b>   | 1. 13°C<br>2.  | <b>End temperature [°C]:</b><br><b>Završna temperatura [°C]:</b>  | 1. 13°C<br>2.                     |                    |
| <b>Acceptance criteria / Kriterij prihvatljivosti:</b>   |  |   |                                   |                    |
| <b>Min. test duration:</b><br><b>Min. trajanje testa:</b>  | 30 min   | <b>Actual duration:</b><br><b>Stvarno trajanje:</b>   | 30 min                            |                    |
| <b>Max. pressure decrease [bar g]:</b><br><b>Max. smanjenje tlaka [bar g]:</b>   |  | <b>Actual pressure decrease [bar g]:</b><br><b>Stvarno smanjenje tlaka [bar g]:</b>                                   | -                                 |                    |
| <b>Max. temperature difference [°C]:</b><br><b>Max. razlika u temperaturi [°C]:</b>  |  | <b>Actual temperature difference [°C]:</b><br><b>Stvarna razlika u temperaturi [°C]:</b>                              | -                                 |                    |
| <b>Accepted:</b><br><b>Prihvaćeno:</b>   | <input checked="" type="checkbox"/> YES<br><input type="checkbox"/> NO | <b>Reference Change Request:</b><br><b>Zahtjev za promjenu:</b>   |                                   |                    |
|  | Company / Naziv tvrtke   | Name / Ime i prezime  | Date / Datum                      | Signature / Potpis |
| Contractor / Izvođač   | Macel plin d.o.o.  | Luka Hlebić   | 03.12.24.                         |                    |
| Client / Investitor  | Vetropack Straža d.d.  |   |                                   |                    |
| Supervisor / Nadzor  | HRB d.o.o.   |   |                                   |                    |
| Tijelo ocjene suklad./ Notify body   | HRB d.o.o.   | Frano Krstinić  | 03.12.24.                         |                    |

OB-221 TS 13

Slika 21. Postupak provođenja tlačne probe na isparivaču UNP-1800 [20]

## 7.9. Potvrda o sukladnosti

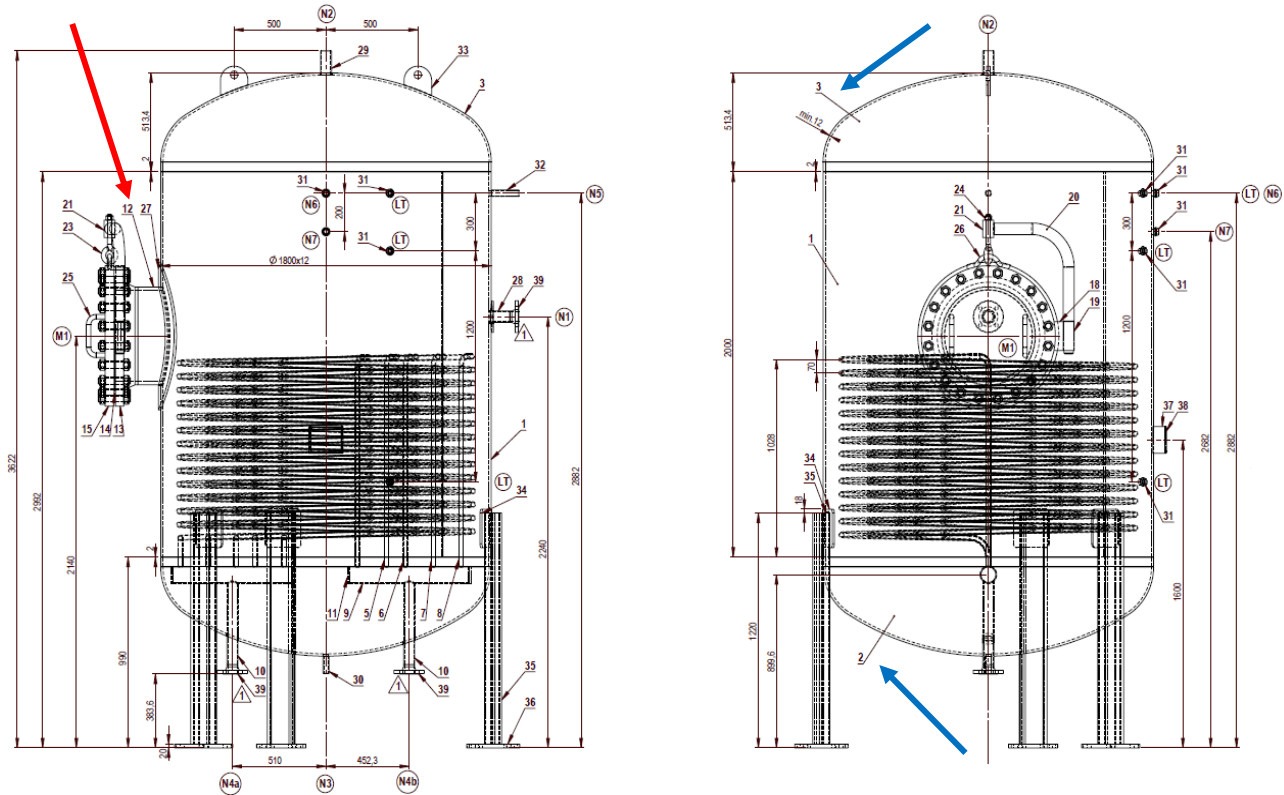
Nakon što tlačna posuda uspješno prođe sve propisane kontrole kvalitete u skladu s modulom G, izdaje se potvrda kojom se potvrđuje da je proizvod izrađen u skladu sa svim tehničkim zahtjevima. Na temelju toga, proizvod dobiva CE oznaku sukladnosti, čime se potvrđuje da zadovoljava relevantne europske direktive i standarde te može biti plasiran na tržište. Primjer takve potvrde prikazan je na slici 22 za isparivač UNP-1800.

| HRVATSKI REGISTAR BRODOVA  |  | Croatian Register of Shipping   |  |
|--|--|---|--|
|   | <b>POTVRDA O SUKLADNOSTI (modul G)</b><br>sukladno Direktivi 2014/68/EZ s dopunama<br><b>CERTIFICATE OF CONFORMITY (module G)</b><br><i>in accordance with Directive 2014/68/EU as amended</i> |   |  |
|  | Br. / No.      02-004400/026025  |   |  |
| <b>POTVRĐUJE SE:</b><br><i>THIS IS TO CERTIFY:</i>   |  |   |  |
| da je HRVATSKI REGISTAR BRODOVA izvršio ocjenu sukladnosti dolje navedenog proizvoda i utvrdio da isti udovoljava zahtjevima Direktive koji se na njega primjenjuju.<br><i>that CROATIAN REGISTER OF SHIPPING made a conformity assessment of below listed product which was found to be in compliance with the requirements of the Directive which apply to it.</i> |  |   |  |
| Naziv proizvođača: <b>MACEL PLIN d.o.o.</b><br><i>Name of manufacturer:</i>  |  |   |  |
| Adresa: <b>Samoborska 15</b><br><i>Address:</i> <b>10090 ZAGREB</b>  |  |   |  |
| Naziv i opis proizvoda; kategorija / fluid<br><i>Product name and description; category / fluid</i>  | Tip<br><i>Type</i>   | Tvornički broj;<br><i>Manufacture No.:</i>  | EU Potvrda o tipnom odobrenju<br>br.<br><i>EU Type Examination Certificate No.</i> |
| Isparivač UNP  | -  | I-UNP-001/24  | -  |
| Kategorija/ Category IV<br>Ukapljeni naftni plin/ voda/ Liquid petrol gas/ water   |  |   |  |
| Proizvođač je ovlašten staviti HRB Ident. br. uz CE oznaku sukladnosti na gore navedene proizvode.<br><i>The manufacturer is authorized to provide a.m. products with CRS Ident. no. to the CE mark.</i>   |  |   |  |
| Izvještaj o pregledu i ispitivanju br.: <b>026025</b><br><i>Examination and testing report no.:</i> <b>NK-40-24, Rev.0</b>   |  |   |  |
| Izdano od: Hrvatskog registra brodova, tijelo za ocjenu sukladnosti Ident. br.: <b>2489</b><br><i>Issued by: Croatian Register of Shipping, notified body Ident. no.:</i>  |  |   |  |
|  |  |  |  |

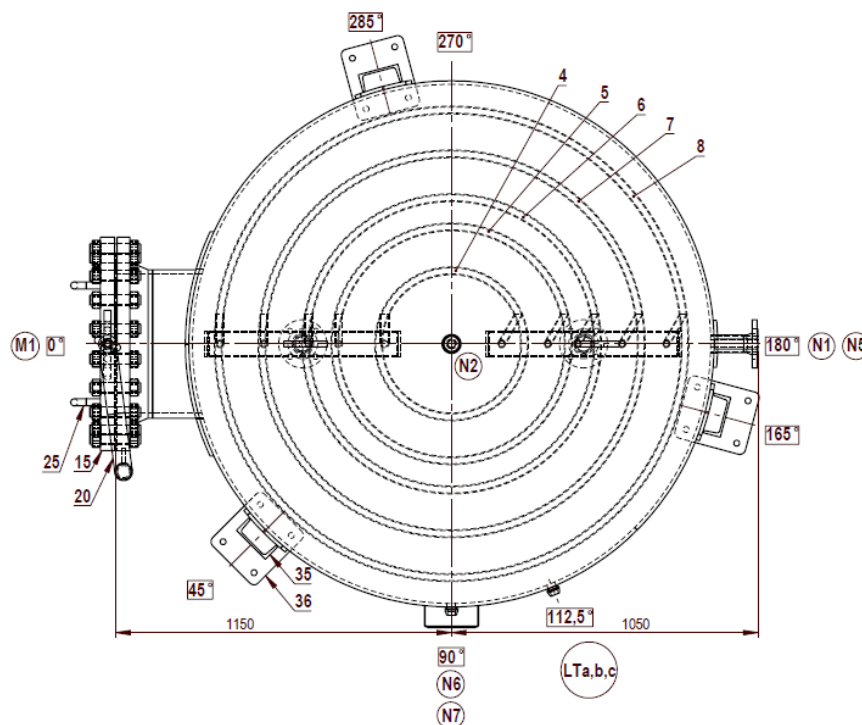
Slika 22. Potvrda o sukladnosti za isparivač UNP-1800 [20]

### 7.10. Izgled isparivača UNP-1800

Isparivač UNP-1800 je sa svim svojim komponentama i potrebnim priključcima je prikazan na slikama 23 i 24.



Slika 23. Isparivač UNP-1800 (nacrt i bokocrt) [20]



Slika 24. Isparivač UNP-1800 (tlocrt) [20]

### 7.11. Najproblematičniji dio izrade isparivača UNP-1800

Najzahtjevniji i najproblematičniji dio izrade isparivača je bio na dijelu spajanja „uboda“ na koje ide ojačanje što je na slici 23 označeno brojevima 12 i 27 (crvena strelica). Najveći problem su stvarale debljina samog materijala i izvedba. Stoga se prvo zavarilo „ubod“, odnosno cijev s prirubnicom kutnim zavarom s vanjske strane, tako da se napravio provrt na posudi te se površina izbrusila i zavarila se cijev s vanjske strane. Zatim se napravilo užljebljenje s unutarnje strane kako bi se poboljšala penetracija zavara i postigla veća čvrstoća spoja, nakon čega je zavareno i s unutarnje strane posude. Zatim se vanjska strana izbrusila do glatke, čiste metalne površine, na koju je potom nanoseno ojačanje, te zavareno REL postupkom zavarivanja. Detaljan opis parametara i svih potrebnih koraka prikazan je WPS-om na slici 17. Ovaj postupak zavarivanja zahtijevao je visoku preciznost, jer svaki korak imao je ključnu ulogu u postizanju potrebne čvrstoće i stabilnosti spojeva, što je od presudne važnosti za sigurnost tlačne opreme.

### 7.12. **Moguća unapređenja procesa izrade**

Moguća unapređenja procesa izrade ovakvog tipa opreme uključuju primjenu brzih tehnologija zavarivanja određenih dijelova. Primjerice, kod zavarivanja komponenti poput „kapa“, odnosno podnica označenih brojem 2 i 3 na slici 23 (plave strelice), gdje je korišten TIG + REL postupak zavarivanja, moguće je za popunu zavara umjesto REL postupka primijeniti učinkovitiji postupak zavarivanja, poput MAG postupka. Time bi se značajno ubrzao proces zavarivanja, uz zadržavanje visoke kvalitete zavarenog spoja.

MAG postupak, osim klasičnog 135 postupka zavarivanja (zavarivanje punom žicom), uključuje i 136 postupak zavarivanja. Postupak 136 označava MAG zavarivanje praškom punjenom žicom prema standardu EN ISO 4063. Ova tehnologija omogućava zavarivanje debljih materijala, smanjuje razinu prskanja prilikom zavarivanja te pruža veću otpornost na vanjske uvjete, što ga čini povoljnijom opcijom u odnosu na postupak 135.

Nedostatak ovog postupka je mogućnost zarobljavanja troske unutar zavarenog spoja, što se najčešće događa pri lošim parametrima zavarivanja, poput premale struje i brzine zavarivanja ili nepravilnog položaja pištolja, stoga je bitna kvalifikacija i uvježbanost zavarivača.

Kako bi se nova tehnologija zavarivanja mogla implementirati u proizvodnju tlačne opreme, nužno je izraditi novu specifikaciju postupka zavarivanja (WPS) i prilagoditi je tehničkim zahtjevima. Nakon toga, potrebno je provesti ispitivanja i ishoditi odgovarajući atest o odobrenju postupka zavarivanja (WPAR). Ako se ispune ovi uvjeti, primjena kombiniranog postupka zavarivanja TIG + MAG (136), optimizira proces proizvodnje tlačne opreme, omogućujući bržu realizaciju zavarivačkih radova, dok se istovremeno održava visoka kvaliteta zavarenih spojeva i veća otpornost na vanjske uvjete u odnosu na prijašnju tehnologiju.

## 8. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad obuhvatio je čitavu analizu proizvodnje tlačne opreme s posebnim naglaskom na procese konstruiranja, odabira materijala i postupaka zavarivanja. Kroz teorijski i eksperimentalni dio rada prikazane su sve važne faze u razvoju tlačnih posuda i cjevovoda, uz detaljno razmatranje relevantnih normi, propisa i postupaka kontrole kvalitete. Naglasak je stavljen na odabir optimalnih tehnoloških rješenja koja osiguravaju pouzdanost i sigurnost tlačne opreme, kao i na važnost certifikacije i kontrole kvalitete u skladu s važećim regulativama.

Tijekom istraživanja istaknute su prednosti i izazovi različitih postupaka zavarivanja, s posebnim fokusom na TIG i REL postupke zavarivanja kao i njihovu kombinaciju. Usporedbom ovih postupaka prikazane su njihove prednosti i nedostaci u kontekstu primjene na tlačnoj opremi, što je ključno za optimizaciju proizvodnog procesa. Eksperimentalni dio rada dodatno je obogatio analizu prikazom konkretne proizvodnje tlačne posude “Isparivača UNP-1800”, gdje su analizirani tehnički zahtjevi, provedene kontrole i konačna ocjena sukladnosti proizvoda s normama.

Jedan od ključnih zaključaka rada jest da pravilnim odabirom materijala, tehnologije zavarivanja i pravilnim konstruiranjem, možemo postići značajno poboljšanje u pogledu efikasnosti i dugovječnosti te odgovoriti na sve postavljene zahtjeve na visoku sigurnost tlačne opreme. Osim toga, primjena naprednih metoda ispitivanja zavara, poput nerazornih metoda, osiguravaju veću sigurnost i pouzdanost opreme u eksploataciji i upotrebi. Također, primjena kompozitnih materijala otvara nove mogućnosti u projektiranju tlačnih posuda s poboljšanom otpornošću na koroziju i smanjenom težinom, što doprinosi poboljšanju sustava.

S obzirom na detaljnost i obuhvat analize, ovaj rad nudi teorijski i eksperimentalni uvid u proizvodnju tlačne opreme te može biti osobito koristan inženjerima i tehničkim stručnjacima koji se bave konstruiranjem i proizvodnjom takve opreme. Predložena unapređenja u proizvodnim procesima i primjena naprednih tehnologija mogu poslužiti kao smjernice za daljnja istraživanja i razvoj ovog područja.



## 9. LITERATURA

- [1] Narodne novine, 2016. *Pravilnik o tlačnoj opremi*. NN 79/2016.
- [2] Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, 2009. *Zbirka naputaka iz područja opreme pod tlakom*. Zagreb.
- [3] Hrvatski zavod za norme, n.d. *Hrvatski standardi i norme*. Dostupno na: <https://www.hzn.hr/> (Posjećeno: 2. siječnja 2025. i 5. veljače 2025.)
- [4] Narodne novine, 2013. *Popis hrvatskih normi za primjenu Pravilnika o tlačnoj opremi*. NN 27/2013.
- [5] Narodne novine, 2016. *Pravilnik o jednostavnim tlačnim posudama*. NN 27/2016.
- [6] Garašić, I., 2024. *Zavarljivost – osnovna načela, materijali s predavanja*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [7] Mišina, N., Oršulić, M. & Polajnar, I., 2003. *Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji*. Naše more, 50(5-6), str. 174-180.
- [8] Alhassan, M. & Bashiru, Y., 2021. *Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels*. Dostupno na: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=113040> (Posjećeno: 7. siječnja 2025.)
- [9] Yousaf, H. & Hamza, M., 2023. *Design and Analysis of a Composite Pressure Vessel*. [https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/170040/preprint\\_pdf/4a18e83773210db7907aa698aa66e60a.pdf](https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/170040/preprint_pdf/4a18e83773210db7907aa698aa66e60a.pdf) (Posjećeno: 7. siječnja 2025.)
- [10] IRJET, 2017. A Review Paper on Study of Pressure Vessel, Design and Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), str. 409-416.
- [11] Karim, M.A., Abdullah, M.Z., Deifalla, A.F., Azab, M. & Waqar, A., 2023. *An Assessment of the Processing Parameters and Application of Fibre-Reinforced Polymers (FRPs) in the Petroleum and Natural Gas Industries*. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023002189> (Posjećeno: 10. siječnja 2025.)

- [12] Trykoz, L., Kamchatnaya, S., Pustovoitova, O. & Atynian, A., 2018. *Reinforcement of Composite Pipelines for Multipurpose Transportation*. Dostupno na: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-34c8b5a6-c939-4fe9-9297-61a9c9c0e242> (Posjećeno: 13. siječnja 2025.)
- [13] Feromihin d.o.o., n.d. *Tehnička dokumentacija*. Zagreb
- [14] Garašić, I., 2024. *Nastavni materijali za predmet "Zavarivanje i montaža"*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [15] Macel plin d.o.o., n.d. *Tehnička dokumentacija*.
- [16] S. U. Aamir, T. A. Qazi, S. U. Rehman, M. A. Malik, and A. U. Rehman, 2019. *Effect of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Parameters on Mechanical Properties of Low-Carbon, Mild and Stainless-Steel Welded Joints: A Review*. *Journal of Applied Engineering & Technology Research (JATER)*, 5(5), str. 1-7. Dostupno na: [https://tafpublishations.com/gip\\_content/paper/Jater-5.5.1.pdf](https://tafpublishations.com/gip_content/paper/Jater-5.5.1.pdf) (Posjećeno: 20. siječnja 2025.)
- [17] Jeyaprakash, N., Haile, A., & Arunprasath, M., 2015. *The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review*. *International Journal of Engineering Research and Technology (IRJET)*, 4(5), str. 409-416.
- [18] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M. & Garašić, I., 2015. *Pogreške u zavarenim spojevima*. Zagreb
- [19] Narodne novine, 2020. *Pravilnik o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom visoke razine opasnosti*. NN 75/2020.
- [20] Macel plin d.o.o., 2024. *Dokumentacija za izradu isparivača UNP-1800*. Zagreb