



B&B  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija  
Program: Strojništvo  
Modul: Orodjarstvo

**OPTIMIZACIJA PARAMETROV  
VARILNEGA PROCESA IN OCENA  
KAKOVOSTI VARJENIH SPOJEV  
VISOKOTLAČNIH CEVOVODNIH  
SISTEMOV**

Mentorica: doc. dr. Lidija Rihar, univ. dipl. inž.

Kandidat: Damjan Lazarevič

Lektorica: Nikita Jaklič, mag. prof. slov. jez. in knjiž.

Ljubljana, januar 2026

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici, doc. dr. Lidiji Rihar, univ. dipl. inž., za strokovno vodenje, konstruktivne usmeritve in podporo pri pripravi te diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi lektorici, Nikiti Jaklič, mag. prof. slov. jezika in književnosti, ki je diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

Posebno zahvalo namenjam svoji družini za potrpežljivost, razumevanje in stalno spodbudo skozi celoten študijski proces.

## IZJAVA

Študent Damjan Lazarević izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Lidija Rihar.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBISS).

Dne: \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **POVZETEK**

Diplomska naloga obravnava problematiko optimizacije parametrov procesa varjenja in ocenjevanja kakovosti varjenih spojev v visokotlačnih cevovodnih sistemih, ki se uporabljajo v energetiki, farmacevtski in procesni industriji. Glavni cilj naloge je bil analizirati vpliv procesnih parametrov varjenja na mikrostrukturo, mehanske lastnosti in korozijsko odpornost spojev ter oblikovati optimalne rešitve za zagotavljanje njihove zanesljivosti in dolge življenjske dobe.

V teoretičnem delu so predstavljene fizikalne in metalurške osnove varjenja, vrste postopkov (MMA, MIG/MAG, TIG, orbitalno varjenje) ter najpogostejše napake in načini njihovega odkrivanja. Posebna pozornost je bila namenjena orbitalnemu varjenju, ki se v industriji uveljavlja kot avtomatiziran postopek z visoko stopnjo ponovljivosti in čistosti spojev.

Eksplozivni del je bil osredotočen na varjenje vzorcev iz nerjavnega jekla AISI 316L. Z uporabo Taguchijeve metode in analize variance (ANOVA) je bila izvedena optimizacija osnovnih parametrov (tok, napetost, hitrost varjenja, zaščitni plin). Rezultati so pokazali, da optimalna kombinacija parametrov omogoča homogeno mikrostrukturo, ustrezno trdoto in odsotnost strukturnih napak. Preizkusi (VT, UT, trdota, upogibni test) so potrdili visoko kakovost varjenih spojev.

V zaključku naloga potrjuje, da je optimizacija procesnih parametrov ključna za zagotavljanje varnosti in zanesljivosti visokotlačnih cevovodnih sistemov. Predlagane rešitve omogočajo neposredno uporabo v industrijski praksi ter predstavljajo osnovo za nadaljnje raziskave na področju avtomatizacije in digitalizacije varilnih procesov.

## **KLJUČNE BESEDE**

- optimizacija
- parametri varjenja
- kakovost spojev
- visokotlačni cevovodi
- TIG varjenje
- orbitalno varjenje
- Taguchi metoda
- nerazorna testiranja

## **ABSTRACT**

This thesis addresses the optimization of welding process parameters and the assessment of welded joint quality in high-pressure pipeline systems, which are widely used in the energy, pharmaceutical, and process industries. The main objective of the research was to analyze the influence of welding process parameters on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of welded joints, and to propose optimal solutions ensuring their reliability and long service life.

The theoretical part presents the physical and metallurgical fundamentals of welding, the main welding processes (MMA, MIG/MAG, TIG, and orbital welding), as well as the most common welding defects and methods of their detection. Special attention is given to orbital welding, which is increasingly applied in industry as an automated process with a high level of repeatability and joint purity.

The experimental part focused on welding test samples made of stainless steel AISI 316L. Using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA), optimization of the main parameters (current, voltage, welding speed, shielding gas) was carried out. The results demonstrated that the optimal parameter combination provides a homogeneous microstructure, appropriate hardness, and absence of structural defects. Testing (VT, UT, hardness, bending tests) confirmed the high quality of the welded joints.

In conclusion, the thesis confirms that optimization of welding process parameters is essential for ensuring the safety and reliability of high-pressure pipeline systems. The proposed solutions enable direct application in industrial practice and provide a foundation for further research in the field of automation and digitalization of welding processes.

## **KEYWORDS**

- optimization
- welding parameters
- joint quality
- high-pressure pipelines
- TIG welding
- orbital welding
- Taguchi method
- non-destructive testing

## KAZALO

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>UVOD</b> .....                                                        | <b>1</b>  |
| 1.1      | Opis raziskovalnega problema .....                                       | 1         |
| 1.2      | Cilj in naloge .....                                                     | 1         |
| 1.3      | Znanstveni in praktični pomen dela .....                                 | 2         |
| <b>2</b> | <b>TEORETIČNE OSNOVE VARILNEGA POSTOPKA</b> .....                        | <b>3</b>  |
| 2.1      | Pomen varjenja v industriji.....                                         | 3         |
| 2.2      | Fizikalne osnove varilnega procesa .....                                 | 4         |
| 2.3      | Metalurške spremembe v varilnem območju .....                            | 5         |
| 2.4      | Struktura in cone varjenega spoja.....                                   | 6         |
| 2.5      | Napake pri varjenju.....                                                 | 7         |
| 2.6      | Razvrstitev in opis varilnih postopkov .....                             | 11        |
| 2.7      | Parametri varilnega procesa .....                                        | 16        |
| <b>3</b> | <b>TEHNOLOGIJE VARJENJA V VISOKOTLAČNIH CEVNIH SISTEMIH</b> .....        | <b>18</b> |
| 3.1      | Obločno varjenje (MMA).....                                              | 19        |
| 3.2      | MIG/MAG varjenje .....                                                   | 21        |
| 3.3      | TIG varjenje .....                                                       | 24        |
| 3.4      | Orbitalno varjenje visokotlačnih cevi .....                              | 26        |
| <b>4</b> | <b>VARILNI PARAMETRI IN NJIHOV VPLIV NA KAKOVOST SPOJA</b> .....         | <b>28</b> |
| 4.1      | Parametri obločnega varjenja (MMA) .....                                 | 28        |
| 4.2      | Parametri MIG/MAG varjenja .....                                         | 29        |
| 4.3      | Parametri TIG varjenja .....                                             | 29        |
| 4.4      | Parametri orbitalnega varjenja .....                                     | 30        |
| 4.5      | Vpliv sprememb parametrov na strukturo in kakovost varjenega spoja ..... | 30        |
| <b>5</b> | <b>OPTIMIZACIJA PARAMETROV VARILNEGA PROCESA</b> .....                   | <b>31</b> |
| 5.1      | Uvod v optimizacijo procesov.....                                        | 31        |
| 5.2      | Optimizacijske metode .....                                              | 32        |
| <b>6</b> | <b>MATERIALI, VARJENJE IN METALURGIJA</b> .....                          | <b>36</b> |
| 6.1      | Osnovni materiali in njihove značilnosti .....                           | 36        |
| 6.2      | Dodatni varilni materiali .....                                          | 38        |
| 6.3      | Metalurški procesi med varjenjem.....                                    | 39        |
| 6.4      | Metalurške napake v varjenih spojih .....                                | 40        |
| 6.5      | Primeri težav, specifičnih za material.....                              | 41        |
| <b>7</b> | <b>PREIZKUŠANJE KAKOVOSTI VARJENIH SPOJEV</b> .....                      | <b>42</b> |
| 7.1      | Nedestruktivno preskušanje zvarov .....                                  | 43        |
| 7.2      | Destruktivno preskušanje varjenih spojev.....                            | 48        |
| 7.3      | Norme in standardi za preskušanje kakovosti spojev.....                  | 50        |
|          | (ISO, EN, ASTM) .....                                                    | 50        |
| <b>8</b> | <b>VPLIV KOROZIJE NA VARJENE SPOJE IN NJIHOVA ZAŠČITA</b> .....          | <b>52</b> |
| 8.1      | Vrste korozije v varjenih spojih .....                                   | 52        |
| 8.2      | Posebnosti korozije v visokotlačnih sistemih .....                       | 54        |

|      |                                                            |    |
|------|------------------------------------------------------------|----|
| 8.3  | Metode protikorozijske zaščite varjenih spojev.....        | 55 |
| 9    | EKSPERIMENTALNI DEL RAZISKAVE .....                        | 58 |
| 9.1  | Določanje eksperimentalnega postopka .....                 | 58 |
| 9.2  | Izvedba optimizacije procesnih parametrov .....            | 60 |
| 9.3  | Eksperimentalno testiranje kakovosti spojin.....           | 62 |
| 9.4  | Predstavitev eksperimentalnih rezultatov .....             | 64 |
| 10   | ANALIZA IN RAZPRAVA REZULTATOV .....                       | 66 |
| 10.1 | Analiza rezultatov optimizacije .....                      | 66 |
| 10.2 | Razprava o kakovosti povezav.....                          | 67 |
| 10.3 | Primerjava teoretičnih in eksperimentalnih rezultatov..... | 68 |
| 10.4 | Smernice in priporočila za prakso .....                    | 69 |
| 11   | ZAKLJUČEK.....                                             | 70 |
| 12   | LITERATURA IN VIRI .....                                   | 71 |

## KAZALO SLIK

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Varjeni spoj .....                                                               | 5  |
| Slika 2: Poroznost.....                                                                   | 7  |
| Slika 3: Razpoka.....                                                                     | 8  |
| Slika 4: Ne zadostna penetracija.....                                                     | 9  |
| Slika 5: Podrezi.....                                                                     | 9  |
| Slika 6: Vključitev žindre.....                                                           | 10 |
| Slika 7: Obločno varjenje z elektrodo .....                                               | 11 |
| Slika 8: Mig/Mag varjenje .....                                                           | 12 |
| Slika 9: Tig varjenje.....                                                                | 13 |
| Slika 10: Plinsko varjenje .....                                                          | 13 |
| Slika 11: Varilec MMA.....                                                                | 20 |
| Slika 12: Varilec MIG/MAG .....                                                           | 22 |
| Slika 13: TIG varilec.....                                                                | 25 |
| Slika 14: Diagram optimizacije varilnega procesa .....                                    | 34 |
| Slika 15: Razvrstitev osnovnih materialov glede na vrsto in uporabo pri varjenju<br>..... | 37 |
| Slika 16: Zaporedje metalurških procesov med varjenjem.....                               | 40 |
| Slika 17: Vizualni pregled.....                                                           | 43 |
| Slika 18: Penetracijski test .....                                                        | 44 |
| Slika 19: Magnetno testiranje.....                                                        | 44 |
| Slika 20: Ultrazvočno testiranje.....                                                     | 45 |
| Slika 21: Rentgenski pregled .....                                                        | 46 |
| Slika 22: Eksperimentalni postopek .....                                                  | 59 |

## KAZALO TABEL

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Primerjalne značilnosti elektrod MMA.....                                        | 20 |
| Tabela 2: Primerjava MIG in MAG varjenja .....                                             | 22 |
| Tabela 3: Vrste žic za MIG/MAG varjenje in njihova uporaba.....                            | 23 |
| Tabela 4: Volframove elektrode za TIG varjenje .....                                       | 25 |
| Tabela 5:Primerjalna tabela procesnih značilnosti orbitalnega in ročnega TIG-varjenja..... | 27 |
| Tabela 6: Optimizacija iz prakse .....                                                     | 35 |
| Tabela 7: Pregled dodatnih varilnih materialov – po postopku in osnovnem materialu .....   | 39 |
| Tabela 8: Primerjava metod preskušanja varjenih spojev .....                               | 47 |
| Tabela 9: Destruktivno preskušanje varjenih spojev.....                                    | 49 |
| Tabela 10: Vrste korozije v varjenih spojih in preventivni ukrepi.....                     | 53 |
| Tabela 11: Tipične nevarnosti korozije v visokotlačnih sistemih .....                      | 55 |
| Tabela 12: Pregled metod zaščite in njihova uporaba .....                                  | 57 |
| Tabela 13: Parametri iz 9 testnih varov .....                                              | 61 |
| Tabela 14: Rezultati preskusov kakovosti varjenja .....                                    | 63 |
| Tabela 15: Tabela eksperimentalnih vzorcev .....                                           | 65 |
| Tabela 16: Tabela priporočil za prakso .....                                               | 69 |

## KRATICE IN AKRONIMI

MMA: Ročno obločno varjenje z oplaščeno elektrodo (angl. Manual Metal Arc Welding)

MIG: Varjenje z inertnim zaščitnim plinom (angl. Metal Inert Gas Welding)

MAG: Varjenje z aktivnim zaščitnim plinom (angl. Metal Active Gas Welding)

TIG: Varjenje z netaljivo volframovo elektrodo v zaščitnem plinu (angl. Tungsten Inert Gas Welding)

NDT: Nedestruktivno testiranje (angl. Non-Destructive Testing)

VT: Vizualni pregled (angl. Visual Testing)

PT: Penetrantno testiranje (angl. Penetrant Testing / Liquid Penetrant Testing)

MT: Magnetno testiranje (angl. Magnetic Particle Testing)

UT: Ultrazvočno testiranje (angl. Ultrasonic Testing)

RT: Radiografsko testiranje (angl. Radiographic Testing)

HAZ: Toplotno vplivano območje (angl. Heat-Affected Zone)

ZUT: Zona vpliva toplote (angl. Heat-Affected Zone)

WPS: Specifikacija varilnega postopka (angl. Welding Procedure Specification)

ISO: Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. International Organization for Standardization)

EN: Evropski standard (angl. European Standard)

DIN: Nemški inštitut za standardizacijo (angl. Deutsches Institut für Normung)

ASTM: ASTM International (angl. ASTM International)

ASME: Ameriško združenje strojnih inženirjev (angl. American Society of Mechanical Engineers)

AWS: Ameriško varilno društvo (angl. American Welding Society)

# 1 UVOD

## 1.1 Opis raziskovalnega problema

V sodobnem industrijskem okolju visokotlačni cevovodni sistemi predstavljajo hrbtenico številnih sektorjev kritične infrastrukture, kot so energetika, kemična industrija in petrokemija (ASME, 2024a). Zanesljivost, trdnost in dolga življenjska doba teh sistemov so v veliki meri odvisne od kakovosti varjenih spojev, ki pogosto predstavljajo najšibkejšo točko v konstrukciji. Na kakovost varjenih spojev vplivajo številni procesni parametri, kot so varilni tok, napetost, hitrost varjenja, vrsta dodatnega materiala in zaščitna atmosfera. Lahko pa tudi pospešijo razvoj korozije. Zato je optimizacija parametrov varilnega procesa nujen korak pri izdelavi zanesljivih in dolgotrajnih visokotlačnih cevovodnih sistemov. Pravilna ocena kakovosti varjenih spojev omogoča pravočasno prepoznavanje morebitnih slabosti, zmanjšuje tveganje za okvaro sistema in prispeva k izboljšanju industrijskih standardov kakovosti (ASME, 2024a, 2024b; British Standards Institution, 2020; International Organization for Standardization, 2021).

## 1.2 Cilj in naloge

Cilj diplomskega dela je raziskati vpliv optimizacije ključnih parametrov varilnega procesa na kakovost varjenih spojev visokotlačnih cevovodnih sistemov in določiti optimalne tehnološke pogoje, ki zagotavljajo maksimalno trdnost, zanesljivost in odpornost spojev. Specifične naloge dela so:

- Analizirati teoretične osnove varilnega procesa in opredeliti najpogosteje uporabljene tehnologije za visokotlačne sisteme (TIG, MIG/MAG, obločno varjenje).
- Raziskati vpliv posameznih procesnih parametrov na kakovost varjenih spojev.
- Izvesti eksperimentalne preizkuse varjenih spojev z različnimi nastavitvami parametrov.
- Uporabiti metode optimizacije procesov za določitev optimalnih nastavitvev.
- Oceniti kakovost spojev z uporabo nedestruktivnih in destruktivnih metod testiranja.
- Podati zaključke o korelaciji med optimiziranimi parametri in doseženimi rezultati kakovosti.

### 1.3 Znanstveni in praktični pomen dela

Z znanstvenega vidika ta naloga prispeva h globljemu razumevanju kompleksne soodvisnosti med tehnološkimi parametri varjenja, mikrostrukturnimi spremembami v območju vpliva toplote (HAZ) in končnimi mehanskimi lastnostmi varjenih spojev (Kou, 2003; ASM International, n.d.). Varilni postopek vključuje intenzivno lokalno segrevanje, ki povzroči taljenje osnovnega in dodatnega materiala, čemur sledi hitro ohlajanje. Posledično nastanejo pomembne mikrostrukture, kot so martenzit, bainit ali perlit – njihov videz je odvisen od hitrosti ohlajanja, vnosa toplote in vrste osnovnega materiala. Razvoj teh mikrostruktur neposredno določa žilavost, trdoto in odpornost spojev proti razpokam in koroziji. Med varjenjem staljena kovina reagira z okoliškimi plini, kot so kisik, vodik in dušik. Prekomerna prisotnost teh plinov lahko povzroči poroznost, plinske razpoke in poslabšanje mehanskih lastnosti (American Welding Society, 2020). Materiali, kot so nerjaveče jeklo in visoko legirane zlitine, so še posebej občutljivi, kjer lahko že manjše mikrostrukturne nepravilnosti spodbudijo lokalno korozijo in mehanski lom. S praktičnega vidika rezultati raziskav ponujajo takojšnje uporabno znanje za optimizacijo varilnih postopkov v visokotlačnih cevovodnih sistemih. Pravilna izbira in spremljanje parametrov – kot so varilni tok, napetost, hitrost premikanja elektrode, temperatura med prehodi in vrsta dodatnega materiala – lahko znatno zmanjša pojav napak, podaljša življenjsko dobo sistema in poveča njegovo varnost. Pridobljene ugotovitve so dragocene tudi za razvoj in nadgradnjo industrijskih smernic in standardov, ki opredeljujejo kakovost, zanesljivost in celovitost spojev v zahtevnih aplikacijah, kot so energetika, kemična industrija in proizvodnja tlačnih posod (ASME, 2024a, 2024b; International Organization for Standardization, 2021).

## 2 TEORETIČNE OSNOVE VARILNEGA POSTOPKA

### 2.1 Pomen varjenja v industriji

Varjenje je eden ključnih tehnoloških procesov sodobne industrije, saj omogoča trajno in učinkovito spajanje kovinskih komponent v konstrukcijah, ki so izpostavljene različnim mehanskim, toplotnim, kemičnim in dinamičnim obremenitvam (American Welding Society, 2020; Kou, 2003). Za razliko od začasnih metod spajanja, kot sta vijačenje ali kovičenje, kakovostni varjeni spoji zagotavljajo visoko trdnost, tesnost in strukturno kompaktnost, zaradi česar so nepogrešljivi v številnih industrijskih sektorjih. Glavna področja uporabe varjenja so:

- *Energetika* – izdelava in vzdrževanje visokotlačnih kotlov, parovodov, cevovodov, reaktorskih posod in turbin, kjer so zahteve glede trdnosti in tesnosti izjemno visoke.
- *Petrokemija in procesna industrija* – proizvodnja tlačnih posod, reaktorjev in cevovodov za transport agresivnih tekočin in plinov, kjer je zanesljivost povezav ključnega pomena za preprečevanje puščanja in okvar.
- *Gradbeništvo in jeklene konstrukcije* – izdelava nosilnih konstrukcij, mostov, industrijskih hal in nosilcev, kjer sta poleg trdnosti pomembna tudi hitra montaža in stroškovna učinkovitost.
- *Avtomobilska in letalska industrija* – natančno varjenje karoserij in konstrukcijskih elementov, kjer so ključne zahteve po majhni teži, odpornosti proti utrujanju in visoki varnosti.
- *Ladjedelništvo in železniška industrija* – varjenje velikih sklopov trupov, vagonov in nadgradenj, ki morajo zagotavljati vzdržljivost in tesnost tudi v zahtevnih obratovalnih pogojih (American Welding Society, 2020; ASME, 2024a).

Razvoj postopkov (TIG, MIG/MAG, orbitalno, lasersko) je močno dvignil produktivnost in ponovljivost ter zmanjšal vpliv človeškega dejavnika. Z digitalizacijo, robotizacijo in sprotnim nadzorom parametrov je to danes standard v panogah z visoko sledljivostjo in varnostnimi zahtevami (jedrska, letalska) (International Organization for Standardization, 2021; ASME, 2024a, 2024b). Ključen je tudi vidik vzdrževanja: kakovostna popravila in rekonstrukcije podaljšajo življenjsko dobo, posebej pri visokotlačnih cevovodih, in znižajo stroške zaustavitev. Varjenje je zato polna inženirska disciplina, katere pomen še raste ob razogljivenju, novih materialih in trajnostni proizvodnji.

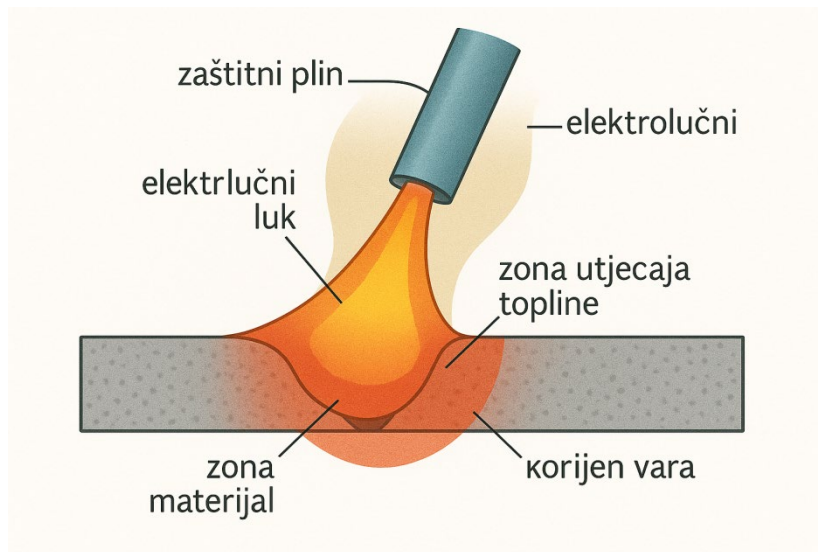
## 2.2 Fizikalne osnove varilnega procesa

Varilni postopek temelji na kompleksni interakciji več fizikalnih, termodinamičnih in metalurških pojavov, ki skupaj omogočajo nastanek trajne metalurške vezi med osnovnim in dodatnim materialom. Ključni predpogoj za doseganje visokokakovostnega in zanesljivega varjenega spoja je ustrezen prenos toplotne energije iz vira (npr. električni oblok, plamen, laserski žarek) na osnovni material, hkrati pa se spremljajo vse spremembe, ki nastanejo kot posledica toplotnega cikla (American Welding Society, n.d.-a; ASM International, n.d.). Toplotni tok med varjenjem je osnovni mehanizem za taljenje materiala in nastanek varilne kopeli. Prenos toplote poteka s kombinacijo prevajanja, konvekcije in sevanja, na učinkovitost prenosa pa vplivajo vrsta vira energije, geometrija varjenja, vrsta zaščitnega plina, položaj varjenja in fizikalne lastnosti materialov, kot sta toplotna prevodnost in specifična toplota (Kou, 2003). Natančno spremljanje intenzivnosti toplotnega toka določa globino preboja varjenja in velikost talilne kopeli. Premajhen vnos toplote lahko povzroči nepopoln preboj in napačno povezavo materialov, medtem ko prevelik vnos vodi do pregrevanja, nepotrebne širjenja toplotno prizadetega območja (HAZ) in rasti grobih zrn, kar negativno vpliva na mehanske lastnosti spoja. Med segrevanjem se osnovni in polnilni material tali. Nastala talina se ob ohlajanju strdi in tvori kristalna zrna. Hitrost ohlajanja določa mikrostrukturo: hitro ohlajanje spodbuja nastanek martenzita z visoko trdnostjo in nizko žilavostjo, medtem ko počasno ohlajanje povzroči nastanek grobozrnate feritno-perlitne strukture, ki zmanjša odpornost zvara proti razpokam. Pomembne strukturne spremembe med varjenjem so:

- *Rekristalizacija*: obnova deformiranih zrn med segrevanjem.
- *Koalescenca zrn*: prehod med kristalnimi strukturami, kot sta avstenit v ferit in perlit, vendar nastanek bainita in martenzita.
- *Fazne transformacije*: prehod med kristalnimi strukturami, kot sta avstenit v ferit in perlit, vendar nastanek bainita in martenzita.
- *Obarjanje sekundarnih faz*: nastanek karbidov, nitridov ali intermetalnih spojin v HAZ, ki lahko zlahka vplivajo na korozijsko odpornost in krhkost spoja.

Glavni cilj sodobnega varilnega postopka je ustvarjanje homogene, močne in stabilne metalurške povezave, kar dosežemo z optimizacijo vseh varilnih parametrov – od spremljanja dovoda toplote do izbire ustrezne hitrosti varjenja in vrste dodatnega materiala. Pravilno uravnotežen dovod toplote omogoča globoko prodiranje brez nepotrebne širjenja HAZ, ohranja optimalne mehanske lastnosti in podaljšuje življenjsko dobo varjenih konstrukcij.

Na sliki 1 je prikazan shematski prikaz varilnega spoja z označenimi ključnimi conami, ki nastanejo zaradi delovanja električnega loka, zaščitnega plina in vnosa toplote.



Slika 1: Varjeni spoj  
(Lastni vir)

### 2.3 Metalurške spremembe v varilnem območju

Varilni postopek ne pomeni le nastanka trdne kovinske vezi med dvema materialoma, temveč sproži tudi vrsto kompleksnih metalurških sprememb v celotnem varilnem območju, ki so posledica intenzivnega in lokaliziranega vnosa toplote. Te spremembe se pojavijo tako v staljenem varu kot v območju vpliva toplote (HAZ), kjer material ni staljen, vendar ga visoke temperature bistveno preoblikujejo na mikrostrukturni ravni. V neposrednem varilnem območju se osnovni in dodatni materiali popolnoma stalijo, nastane talilna lokva, ki se med ohlajanjem strdi z nastankom novih kristalnih zrn in novo mikrostrukturo. Hitrost ohlajanja določa končni pomen mikrostrukture: zelo hitro ohlajanje povzroči nastanek martenzitnih struktur z visoko trdnostjo in zmanjšano žilavostjo, medtem ko počasnejše ohlajanje spodbuja razvoj bolj duktilnih feritno-perlitnih mikrostruktur, ki ugodno vplivajo na mehanske lastnosti zvara (Branko, 2000; Kou, 2003; Lippold & Kotecki, 2005). Območje vpliva toplote (HAZ) je prehodno območje med varilnim šivom in nepoškodovano osnovno strukturo materiala. Čeprav v HAZ ne pride do taljenja, toplotni gradienti povzročajo znatne mikrostrukturne spremembe, kot so rast in koalescenca zrn, rekristalizacija in različne fazne transformacije (npr. prehod avstenita v ferit, bainit ali martenzit). Na tem področju se sekundarne faze, kot so karbidi in nitridi, ki se odlagajo vzdolž meja zrn, zlahka izločijo, kar zmanjša homogenost strukture in poveča dovzetnost za lokalne napake. Cikel termičnega varjenja povzroča spremembe ne le na mikrostrukturni ravni, temveč tudi razvoj notranjih napetosti v varilnem območju. Če te napetosti niso pravilno nadzorovane, lahko povzročijo deformacije, mikrorazpoke ali celo lom strukturnih komponent. Za ohranitev ugodnih mehanskih in kemijskih lastnosti varjenega spoja se uporabljajo tehnični ukrepi, kot so predgrevanje osnovnega materiala,

nadzorovano hlajenje po varjenju in ustrezna toplotna obdelava (npr. popuščanje ali žarjenje). Ti ukrepi zmanjšujejo toplotne napetosti, nadzorujejo mikrostrukturne spremembe in povečujejo homogenost strukture, kar omogoča vzpostavitev spojev s stabilnimi, dolgotrajnimi in zanesljivimi lastnostmi, tudi v najzahtevnejših obratovalnih pogojih (American Welding Society, n.d.-a; ASM International, n.d.).

## 2.4 Struktura in cone varjenega spoja

Varjeni spoj je kompleksen metalurški sistem, sestavljen iz več jasno razločljivih con, od katerih ima vsaka edinstvene mikrostrukturne, mehanske in funkcionalne značilnosti. Popolno razumevanje teh con je bistveno za oceno kakovosti in zanesljivosti spojev, zlasti v aplikacijah, kjer so izpostavljeni visokemu tlaku, dinamičnim obremenitvam in agresivnim medijem – na primer visokotlačni cevovodi v energetski industriji, procesni industriji ali petrokemiji (American Society of Mechanical Engineers, 2024a, 2024b). Varjena površina predstavlja vidni del spoja, katerega geometrija mora biti brezhibna – brez vdolbin, neravnin, prekomernega dviga ali neenakomerne širine. Poleg estetskega pomena je bistvena tudi njena sposobnost enakomernega prenosa napetosti skozi zvar, kar preprečuje lokalne koncentracije napetosti in zmanjšuje tveganje za razpoke ali utrujenost materiala. Koren zvara je kritično območje na nasprotni strani spoja, kjer lahko nepravilnosti, kot so nepopolna penetracija, poroznost ali vključki žlindre, znatno zmanjšajo nosilnost in odpornost spoja proti lomu. Za zagotovitev popolne penetracije in zmanjšanje možnosti napak se uporabljajo napredne tehnike, kot so TIG postopek za varjenje korena, uporaba podpornih obročev ali nadzorovane večplastne varilne plasti (American Welding Society, n.d.-b; Kou, 2003). Toplotno prizadeto območje (HAZ) vključuje del osnovnega materiala v neposredni bližini zvara, ki je bil, čeprav ni trden, med varjenjem izpostavljen visokim temperaturam. Na tem območju pride do rasti zrn, rekristalizacije, faznih prehodov in izločanja sekundarnih faz. Posledično se žilavost zlahka zmanjša, dovzetnost za lom ali korozijo pa se poveča, zlasti kadar pride do grobe mikrostrukture ali neenakomerne porazdelitve faz. Velikost in pomen HAZ sta odvisna od vnosa toplote, hitrosti ohlajanja, vrste osnovnega materiala in uporabljenega varilnega postopka. Območje osnovnega materiala zunaj vpliva toplotnega cikla ohrani svoje prvotne mikrostrukturne in mehanske lastnosti. Njegova glavna naloga je zagotavljanje stabilnosti in neprekinjenosti prenosa obremenitve, kar je ključnega pomena pri spojih v kritičnih segmentih konstrukcije. Optimalen, visokokakovosten varjeni spoj je rezultat usklajevanja vseh zgoraj omenjenih področij: pravilno oblikovana površina, popolnoma prebodena in brez napak korenina, stabilna mikrostruktura zvara in HAZ ter nepoškodovan osnovni material. Za doseg takšne harmonije se uporabljajo ukrepi, kot so večplastni prehodi, strogo nadzorovan vnos toplote, predgrevanje osnovnega materiala, nadzorovano postopno hlajenje, skrbna izbira dodatnega materiala in profesionalna priprava spoja (American Welding Society, n.d.-a; Kou, 2003).

## 2.5 Napake pri varjenju

Kljub visoki stopnji nadzora in avtomatizacije je varilni proces še vedno podvržen številnim napakam, ki lahko znatno poslabšajo kakovost varjenega spoja. Napake pri varjenju ogrožajo mehanske lastnosti spoja, zmanjšujejo odpornost proti koroziji in povečujejo tveganje za zlom pod obremenitvijo, kar ima lahko resne posledice v visokotlačnih sistemih in ekstremnih obratovalnih pogojih (International Organization for Standardization, 2023; American Welding Society, n.d.-a).

Najpogostejše napake, ki se pojavljajo med varjenjem, vključujejo:

- *Poroznost*: Nastane, ko se plini (vodik, dušik, kisik) med strjevanjem ujamejo v zvarno kovino. Vzroki vključujejo kontaminacijo materiala (vlaga, olje, rja), neprimerne zaščitne pline in slabo nastavljene parametre. Porozni zvari imajo zmanjšano trdnost in nizko odpornost proti koroziji (American Welding Society, n.d.-a; Kou, 2003).

Na sliki 2 je prikazan primer poroznosti v varjenem spoju, ki nastane kot posledica ujetja plinov v talino med postopkom varjenja.



Slika 2: *Poroznost*  
(Lastni vir)

- **Razpoke:** Lahko so vroče (nastanejo v poltekočem stanju) ali hladne (pojavijo se po ohladitvi). Vroče razpoke so pogosto posledica nizke upornosti staljene kovine, medtem ko hladne razpoke povzročajo notranje napetosti, vodik ali martenzitno mikrostruktura. Razpoke so kritične napake, ker neposredno ogrožajo nosilnost zvara (International Organization for Standardization, 2023; Kou, 2003; American Welding Society, n.d.-a).

Na sliki 3 je prikazan primer razpoke v varjenem spoju, ki predstavlja eno izmed najnevarnejših varilnih napak zaradi neposrednega vpliva na nosilnost zvara.



Slika 3: *Razpoka*  
(Lastni vir)

- *Nezadostna penetracija:* Ta napaka kaže na nepopolno penetracijo staljene kovine skozi spoj, zaradi česar v prečnem prerezu ostanejo šibke točke. Najpogosteje se pojavi zaradi prenizkega varilnega toka, prehitre hitrosti, slabe priprave spoja ali nepravilne geometrije (International Organization for Standardization, 2023).

Na sliki 4 je prikazan primer nezadostne penetracije varjenega spoja, pri kateri staljena kovina ne prode v celoti skozi spoj.



Slika 4: *Nezadostna penetracija*  
(Lastni vir)

- *Podrezi:* To so vdolbine vzdolž robov zvara, ki jih povzročata prekomerno vnašanje toplote ali nepravilno vodenje elektrode. Zmanjšajo efektivni presek in ustvarjajo koncentradorje napetosti – kritična mesta za nastanek razpok (International Organization for Standardization, 2023).

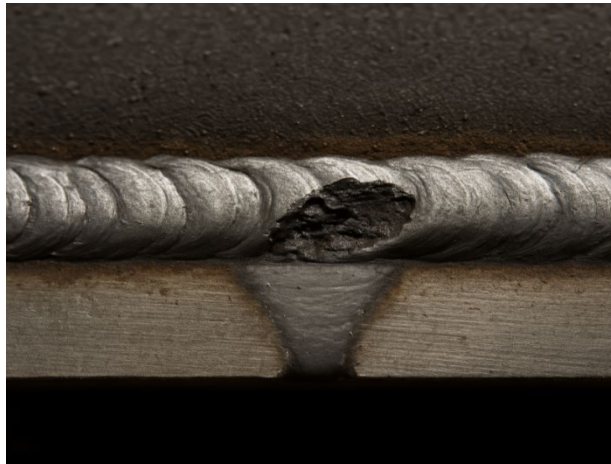
Na sliki 5 je prikazan primer podreza ob robu zvara, ki nastane zaradi neustreznega vnosa toplote ali nepravilnega vodenja elektrode.



Slika 5: *Podrezi*  
(Lastni vir)

- **Vključitev žindre:** Značilno za obločno varjenje s prevlečeno elektrodo. Pojavi se, ko se delci žindre ujamejo med prehodi zaradi slabega čiščenja, slabe tehnike ali napačnega aditivnega materiala. Žindra oslabi spoj in spodbuja razvoj razpok (International Organization for Standardization, 2023).

Na sliki 6 je prikazan primer vključitve žindre v varjenem spoju, ki je značilna napaka predvsem pri obločnem varjenju s prevlečeno elektrodo.



Slika 6: *Vključitev žindre*  
(Lastni vir)

**Vzroki napak:** Napake pri varjenju nastanejo zaradi prepleta tehnoloških, materialnih in človeških dejavnikov. V visokotlačnih sistemih je toleranca na odstopanja minimalna—majhna nepravilnost lahko povzroči puščanje, padec nosilnosti ali celo odpoved sklopa. Zato sta preprečevanje in zgodnje odkrivanje napak ključna (American Welding Society, n.d.-a; Kou, 2003).

Najpogostejši vzroki:

- Napačno nastavljeni parametri – premajhen/prevelik tok, neustrezna napetost obloka, neprimerna hitrost varjenja, nepravilen pretok zaščitnega plina.
- Slaba tehnika – napačna orientacija gorilnika/elektrode, neustrezen vrstni red prehodov, neenakomerna hitrost, predolg oblok, neustrezno vodenje žice.
- Nezdružljivost materialov – neustrezen dodajni material, nagnjenost k vročim razpokam, nastanek krhkih faz.
- Kontaminacija in priprava robov – vlaga, olje, mast, oksidi/rja, prah; neustrezna geometrija in priprava zvarnega roba.

Za hitro prepoznavo in obvladovanje napak se uporabljajo vizualni pregledi (VT) in NDT postopki (npr. PT, MT, UT, RT), po potrebi pa še preskusi mehanskih lastnosti (natez, upogib, trdota) (International Organization for Standardization, 2016a). V kritičnih aplikacijah to dopolnjujeta dosledna uporaba kvalificiranih postopkov (WPS/PQR) in sledljivost parametrov varjenja.

## 2.6 Razvrstitev in opis varilnih postopkov

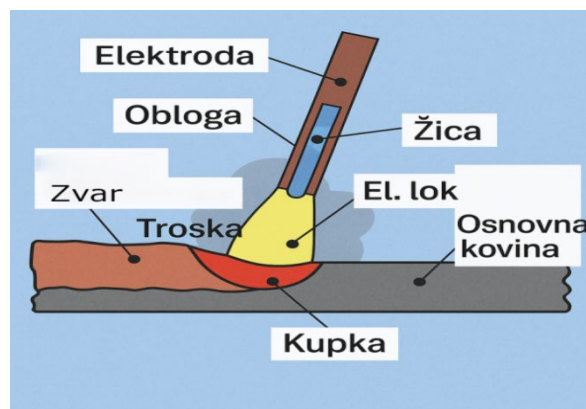
Varjenje je tehnološki postopek spajanja materialov, s katerim se doseže močna metalurška vez med dvema ali več deli. Glede na način ustvarjanja spoja in fizikalna načela se varilni postopki razvrščajo v dve glavni skupini: talilno varjenje in tlačno varjenje.

### Postopki varjenja – taljenje

Pri talilnem varjenju se osnovni material in pogosto tudi dodatni material stalita pod vplivom toplotne energije, pri čemer nastane skupna talina, ki se po ohladitvi strdi v zvarni spoj. Ti postopki so zaradi svoje univerzalnosti in širokega spektra uporabe najpogostejši v industriji (American Welding Society, n.d.-a; ASM International, n.d.). Poznamo naslednje postopke:

- *Obločno varjenje z elektrodo (MMA)*: Ročno obločno varjenje z elektrodo, znano tudi kot MMA (Manual Metal Arc), uporablja električni oblok med prevlečeno elektrodo in osnovnim materialom za ustvarjanje zvara. Prevleke elektrod ustvarjajo zaščitno atmosfero, ki preprečuje kontaminacijo staljene taline. Za varjenje MMA je značilna visoka fleksibilnost in preprosta oprema, zaradi česar je primerno za delo na terenu, montažo in popravila, zlasti v težko dostopnih ali neugodnih delovnih pogojih. Vendar pa zahteva večjo spretnost varilca in ima nižjo produktivnost v primerjavi z avtomatskimi postopki (American Welding Society, n.d.-b; Jovanović, Lazić, & Adamović, 2014).

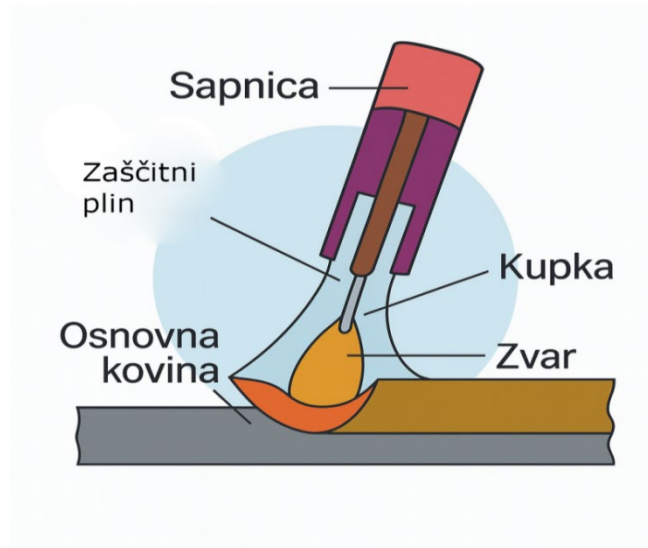
Na sliki 7 je prikazan shematski prikaz postopka obločnega varjenja z elektrodo (MMA), pri katerem električni lok med elektrodo in osnovnim materialom povzroči taljenje zvarne kopeli.



Slika 7: Obločno varjenje z elektrodo  
(Lastni vir)

- **MIG/MAG varjenje MIG:** MIG (Metal Inert Gas) in MAG (Metal Active Gas) sta varilna postopka z žico, ki se neprekinjeno dovaja v talino, pri čemer se uporablja zaščitni plin. Pri MIG postopku se za zaščito zvara uporablja inertni plin (kot je argon), pri MAG postopku pa aktivni plin (npr. mešanica CO<sub>2</sub> in argona), ki lahko kemično reagira s kadjo. Postopki MIG/MAG omogočajo visoko produktivnost, možnost avtomatizacije in uporabo pri različnih vrstah materialov in debelinah. Zaradi svoje hitrosti in učinkovitosti se pogosto uporabljajo pri serijski proizvodnji in varjenju konstrukcij (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.; Jovanović, Lazić, & Adamović, 2014).

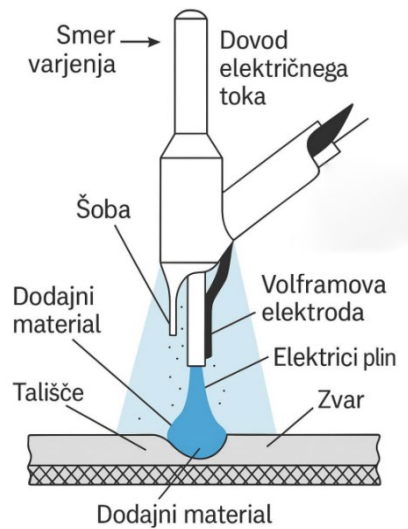
Na sliki 8 je prikazan shematski prikaz postopka MIG/MAG varjenja, pri katerem se dodajna žica neprekinjeno dovaja v zvarno kopel, talino pa ščiti zaščitni plin.



Slika 8: Mig/Mag varjenje  
(Lastni vir)

- **TIG (WIG) varjenje:** TIG (Tungsten Inert Gas) in WIG (Wolfram Inert Gas) varjenje uporablja netaljivo volframovo elektrodo in inertni plin (običajno argon) za zaščito varjenega območja. Zaradi visokega nadzora nad vnosom toplote in procesom nastajanja zvara TIG varjenje omogoča izdelavo vrhunskih zvarov z minimalno količino nečistoč in napak. Postopek TIG je idealen za tanke materiale, nerjaveča jekla in visokozmogljive zlitine (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.). Nepogrešljiv je tudi v aplikacijah, kjer so visoke zahteve po estetskem videzu in natančnosti varjenja, kot so cevovodi v živilski, farmacevtski in kemični industriji.

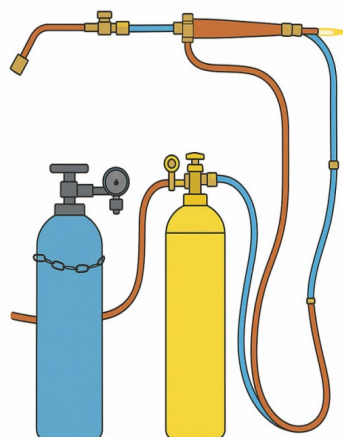
Na sliki 9 je prikazan shematski prikaz postopka TIG (WIG) varjenja z uporabo netaljive volframove elektrode in inertnega zaščitnega plina.



Slika 9: *Tig varjenje*  
(Lastni vir)

- **Plinsko varjenje:** Plinsko varjenje, znano tudi kot avtogeno varjenje, uporablja plamen, ki nastane pri gorenju acetilena v prisotnosti kisika, za taljenje osnovne in dodatne kovine. Ta postopek je bil med prvimi razvitimi metodami varjenja, in čeprav je danes v težki gradbeni industriji manj pogost, se še vedno uporablja za tankostenske materiale, popravila in v specializiranih aplikacijah (American Welding Society, n.d.-a; ASM International, n.d.).

Na sliki 10 je prikazan shematski prikaz postopka plinskega varjenja, pri katerem se za taljenje osnovnega materiala uporablja plamen.



Slika 10: *Plinsko varjenje*  
(Lastni vir)

## Postopki varjenja pod pritiskom

Pri postopkih varjenja pod pritiskom se spajanje materialov doseže z uporabo sile, z minimalnim ali brez vnosa toplote. Ti postopki omogočajo nastanek spojev brez taljenja osnovnega materiala, s čimer se izognemo nekaterim problematičnim mikrostrukturnim spremembam (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.).

- *Hladno varjenje:* Hladno varjenje je postopek, pri katerem se materiali spajajo izključno z uporabo visokega tlaka, brez uporabe toplotne energije. Hladno varjenje omogoča spajanje mehkih kovin, kot so aluminij, baker in njihove zlitine, z minimalno spremembo lastnosti osnovnega materiala. Ta postopek se pogosto uporablja v specializiranih panogah, kjer je potrebna visoka čistost spojev.
- *Točkovno varjenje:* Točkovno varjenje temelji na ustvarjanju toplote zaradi električnega upora na stični površini dveh delov, ki ju je treba spojiti. Spoj se doseže s kombinacijo lokalno ustvarjene toplote in uporabljenega tlaka. Ta postopek je še posebej primeren za spajanje tankih pločevin in se pogosto uporablja v avtomobilski industriji, proizvodnji gospodinjskih aparatov in serijski proizvodnji (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.).

## Najboljše prakse za visokotlačne cevovodne sisteme

V visokotlačnih cevovodnih sistemih, kjer so obratovalni pogoji zaradi visokega tlaka, temperaturnih nihanj in morebitne izpostavljenosti agresivnim tekočinam izjemno zahtevni, so varjeni spoji podvrženi najvišjim zahtevam glede trdnosti, tesnosti in odpornosti proti koroziji. Zato je izbira ustrezne varilne tehnologije ključnega pomena za varnost, zanesljivost in trajnost sistema (American Society of Mechanical Engineers, 2024a, 2024b; American Welding Society, n.d.-a). Najprimernejša in najpogosteje uporabljena postopka v takšnih aplikacijah sta TIG (WIG) varjenje in orbitalno varjenje, oba pa temeljita na principu netaljive volframove elektrode v zaščitni atmosferi inertnega plina (običajno argona) (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.).

- *TIG (WIG) varjenje:* TIG varjenje omogoča zelo natančen nadzor nad vnosom toplote, kar je še posebej pomembno pri varjenju tankostenskih cevi iz nerjavečega jekla, nikljevih zlitin ali drugih visoko legiranih materialov. Ta postopek zagotavlja čiste in na napake odporne zveze z minimalnim vključevanjem nečistoč in visoko estetsko kakovostjo (American Welding Society, n.d.-b; Kou, 2003; ASM International, n.d.).

Prednosti TIG varjenja v kontekstu visokotlačnih sistemov vključujejo:

- minimalno območje vpliva toplote (HAZ), ki zmanjšuje tveganje za degradacijo konstrukcijskega materiala,
- zmožnost doseganja globoke in popolne penetracije, kar je bistveno za tesnost in mehansko stabilnost spojev,
- visoko kakovost in ponovljivost zvarov, kar je pomembno v kritičnih sektorjih, kot so farmacevtska, kemična in jedrska industrija.
  
- *Orbitalno varjenje:* Orbitalno varjenje je avtomatizirana oblika TIG postopka, pri katerem se varilna glava krožno premika okoli mirujoče cevi. Omogoča brezhibno enakomerne zware na vrsti spojev z zelo natančnim nadzorom parametrov, kot so varilni tok, hitrost vrtenja, dovod toplote in pretok plina (American Society of Mechanical Engineers, 2024c; International Organization for Standardization, 2021a, 2021b).

Še posebej je primerno v panogah, ki zahtevajo visoko ponovljivost in sterilnost, kot so:

- farmacevtska industrija,
- živilska industrija (CIP/SIP sistemi),
- elektronika (povezava vakuumskih cevi in senzorskih vodov),
- proizvodnja čistih tekočin pod tlakom.

Glavne prednosti orbitalnega varjenja:

- avtomatizacija odpravlja človeške napake in povečuje zanesljivost,
- zagotavlja homogene spoje brez odstopanj v kakovosti,
- postopek je enostavno dokumentirati in validirati v skladu s standardi kakovosti (American Society of Mechanical Engineers, 2024c; International Organization for Standardization, 2021a, 2021b).

Izbira med TIG in orbitalnim varjenjem je odvisna od geometrije spoja, razpoložljivosti opreme, obsega proizvodnje in zahtev glede kakovosti. Pri serijski proizvodnji in tam, kjer je potrebna visoka raven dokumentacije in sledljivosti, je orbitalno varjenje prednostno. Za posamezne spoje in varjenje v težkih pogojih (npr. montaža na terenu) se TIG varjenje še naprej izkazuje kot nepogrešljivo.

## 2.7 Parametri varilnega procesa

Varilni parametri so niz tehničnih spremenljivk, ki neposredno določajo kakovost, varnost in zanesljivost varjenega spoja. Njihova pravilna nastavitve igra ključno vlogo pri nadzoru vnosa toplote, geometrije zvara, mikrostrukturnih sprememb v območju vpliva toplote (HAZ), pa tudi mehanskih lastnosti celotnega spoja. Pri izdelavi visokotlačnih cevovodov, kjer so tehnične zahteve izjemno visoke, je treba varilne parametre natančno optimizirati, da se izognemo napakam, kot so razpoke, poroznost in nezadostna penetracija.

- *Varilni tok (A)*: Varilni tok neposredno določa količino toplotne energije, vnesene v material, v skladu z Joule-Lenzovim zakonom, kjer se razvita toplota povečuje sorazmerno s kvadratom toka. Povečanje varilnega toka poveča globino prodiranja, premer staljenega bazena in širino šiva. Pri debelejših materialih višji tok omogoča popoln prenos toplote skozi prečni prerez, kar zagotavlja trdnost spoja. Vendar pa nepravilno visok varilni tok vodi do prekomernega vnosa toplote, širitve območja vpliva toplote (HAZ), pojava grobih zrn v strukturi varjene kovine in zmanjšanja žilavosti. Poveča tudi možnost vročih razpok zaradi daljšega časa hlajenja. Po drugi strani pa lahko prenizek varilni tok povzroči nepopolno taljenje osnovnega materiala, nastanek hladnih spojev in zmanjšano nosilnost varjenega dela. Pravilna izbira toka je ključnega pomena, in mora biti usklajena z debelino materiala, vrsto spoja, tehniko vodenja elektrode in vrsto postopka (MIG, TIG, MMA) (Kou, 2003; American Welding Society, n.d.-b).
- *Napetost obloka (V)*: Napetost obloka ima funkcijo stabilizacije in oblikovanja električnega obloka med virom toplote in osnovnim materialom. Njena vrednost vpliva na širino, obliko in stabilnost taline. Visoka napetost ustvari širši oblok in širši varilni spoj, hkrati pa zmanjša globino preboja, kar je lahko neugodno za debelejšje stene. Prav tako previsoka napetost poveča tveganje za poroznost zaradi turbulentnega obnašanja taline in slabše zaščite staljene kovine pred atmosferskimi vplivi. Premalo visoka napetost pa ustvari ozek in koncentriran oblok, kar omogoča globlji preboj, vendar lahko oteži nadzor nad nastankom zvara, zlasti pri varjenju tankih sten. Optimalno nastavljena napetost omogoča enakomerno taljenje, stabilen prenos kapljic dodatne kovine in nastanek homogene varjene plasti (American Welding Society, n.d.-b; ASM International, n.d.).
- *Hitrost varjenja (mm/min)*: Hitrost varjenja določa količino dovoda toplotne energije na enoto dolžine varjenega spoja in vpliva na obliko staljenega kupa, velikost zvara in širino območja vpliva toplote. Prevelika hitrost varjenja zmanjša skupni dovod toplote, povzroči ozke in plitke zware ter poveča tveganje za nepopolno prevarjenje in nastanek hladnih spojev. V takih primerih ima lahko varjeno območje slab stik med osnovnim in dodajnim materialom, kar negativno

vpliva na mehansko trdnost. Po drugi strani pa prenizka hitrost varjenja vodi do prekomernega dovoda toplote, širi HAZ, spodbuja rast grobih zrn, povečuje tveganje za vroče razpoke in zmanjšuje odpornost proti koroziji. Poleg tega počasnejše varjenje poveča količino dodatnega materiala, ki vstopa v spoj, kar lahko povzroči neželene spremembe v geometriji zvara. Optimalna hitrost mora omogočati popolno prevarjenje, pravilno geometrijo zvara in omejevati neželene metalurške spremembe v osnovnem materialu (Kou, 2003; American Welding Society, n.d.-b).

- *Debelina žice ali elektrode:* Debelina dodatnega materiala je ključnega pomena za stabilnost varilnega procesa, obliko kapljic pri prenosu materiala in dinamiko rasti staljene taline. Tanjša žica omogoča boljši nadzor pri varjenju tankih profilov, zmanjšuje dovod toplote in omogoča fino regulacijo količine staljenega materiala. Po drugi strani pa debelejša žica omogoča večjo količino taljenja na enoto časa, kar je potrebno za varjenje debelejših materialov, vendar povečuje tveganje za prekomerni dovod toplote in zmanjšano kakovost zvara, če parametri niso optimalno nastavljeni. Debelina žice mora biti usklajena z varilnim tokom, napetostjo obloka, hitrostjo varjenja in želenim profilom zvara, da se doseže optimalna kakovost zvara (American Welding Society, n.d.-b; Jovanović, Lazić, & Adamović, 2014).
- *Vrsta in pretok zaščitnega plina:* Zaščitni plin ima dvojno funkcijo: preprečuje vstop kisika, dušika in vodika iz atmosfere v talino ter stabilizira električni oblok.

Vrsta plina se izbere glede na vrsto materiala in postopek varjenja:

- Inertni plini (argon, helij) se uporabljajo za materiale, občutljive na oksidacijo, kot so aluminij, titan in nerjaveča jekla.
- Aktivni plini (CO<sub>2</sub>, mešanice Ar-CO<sub>2</sub>) se uporabljajo pri varjenju konstrukcijskih jekel, kjer je dovoljena rahla kemična interakcija plina s kovino.

Pretok plina mora biti dovolj visok, da prepreči kontaminacijo, vendar ne tako visok, da bi povzročil turbulenco in mešanje z zrakom. Previsok pretok lahko moti stabilnost loka in zaščitne atmosfere, medtem ko prenizek pretok ne zagotavlja zadostne zaščite in vodi do oksidacije in poroznosti zvara. Optimalna izbira in regulacija zaščitnega plina sta ključnega pomena za doseganje estetsko privlačnih in tehnično pravih varjenih spojev, zlasti pri visokokakovostnih aplikacijah American Welding Society, n.d.-b; Kou, 2003; Lončar & Starčević, 1984).

### 3 TEHNOLOGIJE VARJENJA V VISOKOTLAČNIH CEVNIH SISTEMIH

Varjenje v visokotlačnih cevovodnih sistemih je ena tehnično najzahtevnejših aplikacij varilnih tehnologij, saj morajo spoji zagotavljati popolno tesnost, visoko mehansko trdnost ter odpornost proti koroziji in utrujanju v ekstremnih obratovalnih pogojih. Takšni sistemi pogosto delujejo pod tlakom, ki presega 100 barov, in pri povišanih temperaturah, zato je treba vsak varjeni spoj izvesti po najstrožjih standardih (EN ISO, ASME B31.1/B31.3) (American Society of Mechanical Engineers, 2024a, 2024b). V praksi se najpogosteje uporabljajo postopki, kot sta TIG (WIG) in orbitalno varjenje, zaradi njihove sposobnosti zagotavljanja natančnega nadzora vnosa toplote, visoke kakovosti zvara in odlične ponovljivosti. TIG varjenje omogoča izdelavo čistih, homogenih in estetsko sprejemljivih spojev, kar je ključnega pomena v farmacevtski, živilski in energetski industriji. Orbitalno varjenje kot avtomatizirana različica TIG se uporablja pri serijski proizvodnji spojev na ceveh manjših premerov, kjer sta potrebna visoka natančnost in konstantna kakovost brez vpliva človeškega dejavnika. Poleg tega se v težkih pogojih dostopa ali na terenu pogosto uporablja MMA (varjenje kovinskega obloka s prevlečeno elektrodo), zlasti za korenske plasti, medtem ko se končne plasti lahko izvedejo s tehnikami TIG ali MIG/MAG. Uporaba ustreznih elektrod (npr. bazičnih z nizko vsebnostjo vodika) in ustrezna priprava spoja sta ključnega pomena za zanesljivost in trajnost varjenega sistema. Izbira ustrezne tehnologije temelji na tehničnih zahtevah konstrukcije, vrsti materiala, dimenzijah cevi in obratovalnih pogojih ter vključuje skrbno prilagajanje parametrov, kot so varilni tok, napetost, hitrost varjenja in pretok zaščitnega plina. Kakovost spojev se preverja s strogo določenimi preskusnimi postopki, vključno z vizualnimi pregledi, nedestruktivnimi preiskavami (UT, RT, PT) in včasih hidravličnim testiranjem pod povečanim tlakom (International Organization for Standardization, 2016a, 2016b, 2018, 2022).

### 3.1 Obločno varjenje (MMA)

Ročno obločno varjenje (MMA) je ena najdlje uveljavljenih in obenem najbolj prilagodljivih varilnih metod, zato ostaja prva izbira pri montažnih delih, v elektrarnah in pri gradnji ter vzdrževanju visokotlačnih cevovodov. Postopek temelji na električnem obloku med prevlečeno, taljivo elektrodo in osnovno kovino. V območju obloka nastane vroča plazma s temperaturami približno 5–6 tisoč °C, ki stali vrh elektrode in rob osnovnega materiala ter oblikuje talilno kopel. Posebnost MMA je v prevleki elektrode: med taljenjem se prevleka razgradi, sprosti zaščitne pline in tvori žlindro, ki kopel pokrije in jo med ohlajanjem ščiti pred oksidacijo. Zaradi te "samozadostne" zaščite postopek ne potrebuje zunanega plina, kar je velika prednost v zahtevnih terenskih pogojih – na prostem, v jaških, na višini ali v omejenih prostorih – kjer so druge tehnologije logistično ali varnostno težje izvedljive.

V praksi se kot vir napajanja najpogosteje uporablja enosmerni tok s pozitivnim polom na elektrodi (DC+), saj tako dobimo stabilnejši oblok in zanesljivejšo penetracijo. Stabilnost procesa v veliki meri določa dolžina obloka, ki jo varilec drži kratko in enakomerno; predolg oblok razprši toploto, povzroča plitvejšo prodiranje in večjo verjetnost poroznosti, prekratek pa prinese brizganje in lepljenje. Enako pomembna je tehnika vodenja: naklon elektrode, ritmičen napred in širina zamaha se prilagajajo legi varjenja in debelini stene, pri koreninskih slojih na ceveh pa se praviloma uporabljajo ozke, "stringer" gosenice. Nadzor vnosa toplote in interpasne temperature je pri tlačnih sistemih ključnega pomena, saj neposredno vpliva na mikrostrukturo zvara in toplotno vplivanega območja (TVP/HAZ). V praksi se varilec in nadzornik držita okvirov, predpisanih v WPS, ter sproti spremljata napetost, tok, hitrost in interpas, da ostanejo v dovoljenem "oknu".

Izbira elektrode je odvisna od položaja varjenja, zahtev spoja in obratovalnih pogojev. Celulozne elektrode (npr. E6010/E6011) omogočajo globoko penetracijo in delo v vseh položajih, zato so uporabne za koren in montažne situacije, čeprav puščajo grobejši videz šiva. Rutilne elektrode (E6013) slovijo po mirnem obloku in lepem izgledu, primerne so za tanjše stene in manj zahtevne spoje. Za visokotlačne cevovode pa se uveljavljajo predvsem bazične, nizkovodikove elektrode (E7018/E7016), ker znižujejo vsebnost difuznega vodika v zvaru in s tem občutno zmanjšajo nevarnost hladnih razpok. Da bi ohranili njihove lastnosti, je nujno pravilno skladiščenje in sušenje v skladu s priporočili proizvajalca ter uporaba ogrevanih tobolecev na terenu (American Welding Society, n.d.-b; American Society of Mechanical Engineers, 2025).

Kakovost zvarov v tlačnih sistemih se ne prepušča naključju. Zahteve glede oblike, polne penetracije in notranje kakovosti določa nabor standardov, kot so EN ISO 5817 (kakovost zvarov), EN ISO 9606-1 (kvalifikacija varilcev) in EN ISO 15614-1 (kvalifikacija postopkov), pri sistemih po ameriških pravilnikih pa tudi ASME Section

IX in B31.1/B31.3. Preverjanje poteka večstopenjsko: najprej vizualni pregled za geometrijo in površinske nepravilnosti, po potrebi penetrantska ali magnetna preiskava za površinske napake ter ultrazvočno ali radiografsko preiskovanje za notranje nepravilnosti; skladno s projektom se izvedejo tudi mehanski preizkusi in na koncu hidrotest sklopa, ki preseže projektni tlak. Vse skupaj spremljata sledljivost in disciplina dokumentiranja: delo po kvalificirani WPS, veljaven PQR in zapis ključnih parametrov zagotavljajo, da je vsaka zvara sledljiva do porabe elektrod, nastavitvev in vključenih oseb (International Organization for Standardization, 2016a, 2016b, 2018, 2021, 2022).

Vloga MMA v visokotlačnih cevovodih je zato zelo konkretna. Pogosto se uporablja za izvedbo koreninskih slojev, kjer štejeta zanesljiva penetracija in procesna robustnost, zaključni sloji pa se – kadar to narekujejo zahteve po videzu ali produktivnosti – izvedejo s TIG ali MIG/MAG, kar tvori učinkovit hibridni pristop. Prav zaradi kombinacije prenosljive opreme, neodvisnosti od plina, tolerance do težavnih delovišč in možnosti kakovostne izvedbe v vseh legah ostaja MMA zanesljiva izbira tam, kjer sta tesnost in varnost sistema absolutni prioriteti.

V tabeli 1 so prikazane primerjalne značilnosti najpogosteje uporabljenih elektrod za postopek MMA varjenja.

| Vrsta elektrode | Položaj   | Globina prodiranja | Površina šiva  | Vrsta zaščite |
|-----------------|-----------|--------------------|----------------|---------------|
| E6010           | Vse       | Globoko            | Grobo          | Celulozna     |
| E6013           | Vodoravno | Zmerno             | Gladko         | Rutilna       |
| E7018           | Vse       | Globoko            | Srednje gladko | Bazična       |

Tabela 1: *Primerjalne značilnosti elektrod MMA*  
(Lastni vir)

Na sliki 11 je prikazan varilec pri izvajanju postopka MMA varjenja v praksi.



Slika 11: *Varilec MMA*  
(Lastni vir)

## 3.2 MIG/MAG varjenje

MIG (Metal Inert Gas) in MAG (Metal Active Gas) sta obločna postopka s taljivo žico, pri katerih med neprekinjeno dovajano žico in osnovnim materialom gori električni oblok, talina pa je zaščitena s plinom iz šobe gorilnika. Pri MIG varjenju se uporabljajo inertni plini, kot sta argon ali helij, kar je primerno za nerjavna jekla in neželezne kovine, pri MAG pa aktivni plini oziroma mešanice ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ ), ki podpirajo stabilizacijo obloka in učinkovit prenos kovine pri ogljikovih in nizkolegiranih jeklih. Ker žica neprekinjeno podaja dodajni material, je proces produktiven, oblok stabilen, vnos toplote dobro obvladljiv, zvar pa ima praviloma urejen videz. Oprema združuje vir napajanja z značilno napetostno-tokovno karakteristiko, podajalnik žice, plinsko oskrbo in gorilnik; proces je lahko ročni, polavtomatski ali popolnoma avtomatiziran (American Welding Society, n.d.-b; American Society of Mechanical Engineers, 2024a, 2024b).

V industrijski praksi sta MIG/MAG zaradi hitrosti in možnosti avtomatizacije zelo razširjena v serijski proizvodnji, jeklenih konstrukcijah, ladjedelništvu ter pri delavniški prefabrikaciji cevovodov. V visokotlačnih sistemih se njuna uporaba običajno veže na kontrolirane pogoje: korenska plast se pogosto izvede s TIG ali MMA zaradi zagotavljanja popolne penetracije in tesnosti, polnilne in pokrovne plasti pa z MAG (pri konstrukcijskih jeklih) oziroma z MIG (pri nerjavnih in aluminijevih zlitinah), s čimer se združita kakovost in produktivnost. Tak "hibridni" pristop je pogost pri parovodih, toplotnih izmenjevalnikih in tlačni opremi, kjer so stabilen oblok, ponovljivost in dobra sledljivost procesa ključni.

Kakovost zvarov je močno odvisna od urejenih osnov: čiste in pravilno pripravljene robove, ustrezno izbrano žico (kemijska skladnost, premer glede na debelino), pravilno nastavljen pretok in sestavo zaščitnega plina, ter dobro umerjene parametre — hitrost podajanja žice, napetost obloka, varilni tok in potovalno hitrost. Ker zaščitna atmosfera ni "samodejna" kot pri MMA, je proces občutljiv na veter in prepih; neustrezna zaščita hitro privede do poroznosti. Druga pogosta tveganja so povečano toplotno vplivano območje in večji vnos toplote, kar lahko pri tlačnih spojih poslabša mikrostrukturo in žilavost, zato se parametre vodi v ozkem oknu iz WPS, z nadzorom interpasne temperature in po potrebi s prilagoditvijo toplotnega vnosa (Kou, 2003; American Welding Society, n.d.-b; Hobart Brothers, n.d.).

Normativno morajo MIG/MAG spoji v tlačnih in procesnih sistemih izpolnjevati zahteve EN 13480 oziroma ASME B31.1/B31.3, postopki se kvalificirajo po EN ISO 15614-1 (oziroma ASME IX), varilci pa po EN ISO 9606-1. Zahtevana raven notranje in površinske kakovosti se preverja z vizualnim pregledom ter po potrebi z NDT postopki (PT, MT, UT, RT), pri opremi pa sledi še hidrostatični preizkus. V takem okviru MIG/MAG pokažeta svojo največjo prednost: v delavniških, ponovljivih pogojih omogočata hitro, enakomerno nalaganje materiala in trajno kakovost, kar skrajša čas izdelave in zmanjša obseg naknadne obdelave — ob predpostavki, da je zaščita s plinom, priprava spoja in vodenje parametrov izvedeno brez kompromisov (British Standards Institution, 2024; International Organization for Standardization, 2012,

2016a, 2016b, 2017, 2018, 2022, 2023; American Society of Mechanical Engineers, 2024a, 2024b, 2025).

V tabeli 2 je prikazana primerjava osnovnih značilnosti postopkov MIG in MAG varjenja.

| Značilnost                       | MIG varjenja                      | MAG varjenja                                                  |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Zaščitni plin                    | Inertno (npr. Ar, He)             | Aktivno (npr. mešanice CO <sub>2</sub> , Ar+CO <sub>2</sub> ) |
| Materiali                        | Aluminij, nerjaveče jeklo, baker  | Ogljikova in nizkolegirana jekla                              |
| Reakcije plina s kovino          | Brez                              | Obstoječa (blaga oksidacija)                                  |
| Uporaba v visokotlačnih sistemih | Končni prehodi na nerjavnem jeklu | Končna obdelava konstrukcijskega jekla                        |
| Občutljivost na okolje           | Visoka                            | Visoka                                                        |

Tabela 2: Primerjava MIG in MAG varjenja  
(Lastni vir)

Na sliki 12 je prikazan praktični primer izvajanja postopka MIG/MAG varjenja.



Slika 12: Varilec MIG/MAG  
(Lastni vir)

V tabeli 3 so prikazane najpogosteje uporabljene vrste žic za postopke MIG/MAG varjenja ter njihova področja uporabe.

| <b>Vrsta žice</b>       | <b>Oznaka</b>          | <b>Vrsta materiala</b>           | <b>Uporaba</b>                                                   | <b>Značilnosti</b>                                               |
|-------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Trdna žica              | G3Si1,<br>G4Si1        | Ogljikova in nizkolegirana jekla | Splošna uporaba v strojništvu, konstrukcijah in tlačnih sistemih | Stabilen oblok, dober videz varilnega zvara, nizko brizganje     |
| Trdna žica - CrNi       | G19-9L Si,<br>G18-8 Mn | Nerjaveča jekla                  | Kemična, živilska, farmacevtska industrija                       | Odpornost proti koroziji, potreben je inertni plin               |
| Žica s kovinskim jedrom | MC1, MC3               | Konstruktivna jekla              | Visoka produktivnost, avtomatizacija                             | Manj žindre, večja talilnost, primerno za hitre prehode          |
| Polnjena žica (FCW)     | T42 0 P<br>M21 1 H5    | Ogljikova in nizkolegirana jekla | Varjenje v vseh položajih, še posebej na terenu                  | Ne potrebuje dodatnega plina visoka odpornost na neugodne pogoje |
| Aluminijasta žica       | AlSi5,<br>AlMg5        | Aluminij in zlitine              | Varjenje lahkih konstrukcij, ladjedelništvo                      | Zahteva čisti Ar kot plin, dobra odpornost proti koroziji        |
| Bakrena žica            | CuSi3                  | Baker in zlitine                 | Električne inštalacije, toplotni izmenjevalniki                  | Dober prenos toplote, potrebna je natančna regulacija parametrov |

Tabela 3: Vrste žic za MIG/MAG varjenje in njihova uporaba  
(Lastni vir)

### 3.3 TIG varjenje

TIG varjenje je natančen obločni postopek, pri katerem toploto za taljenje ustvarja stabilen električni oblok med netaljivo volframovo elektrodo in osnovnim materialom. Ker se elektroda ne tali, varilec količino dodatnega materiala po potrebi dozira ločeno, kar omogoča zelo fin nadzor nad obliko kopeli, penetracijo in geometrijo šiva. Varilno območje je ves čas zaščiteno z inertnim plinom—najpogosteje argonom, pri nekaterih zlitinah tudi helijem—da se izogne oksidaciji, vnosu dušika ali vlagi. Rezultat je izjemno čista talina brez žilindre in brizganja, z minimalnim toplotnim vplivom na osnovni material.

Izbira toka in polarnosti sledi materialu: pri jeklih se uporablja enosmerni tok z negativnim polom na elektrodi (DCEN), ki daje globoko in mirno penetracijo; pri aluminiju in njegovih zlitinah pa izmenični tok (AC), saj združuje talilno zmogljivost z učinkom čiščenja oksidne plasti. Ključni procesni parametri—jakost toka, potovalna hitrost, premer volframove elektrode ter vrsta in pretok zaščitnega plina—se vodijo v ozkem oknu; prav to omogoča varjenje zelo tankih sten brez deformacij in natančno kontrolo mikrostrukture v HAZ.

V industriji je TIG prva izbira tam, kjer je kakovost absolutna zahteva: pri tankostenskih ceveh, zahtevnih zlitinah nerjavnih jekel, niklja, titana, aluminija ter pri dupleksnih in superdupleksnih jeklih. V energetiki in procesni industriji se zato pogosto uporablja za korenske sloje na tlačnih spojiščih parovodov, toplotnih izmenjevalnikov in reaktorske opreme, kjer mora biti zvar tesen, homogen in brez notranjih nepravilnosti. Zaradi izjemno čistega postopka je TIG standard tudi v farmacevtskih in živilskih instalacijah, kjer gladke površine brez por in ostre prehode zahtevajo sanitarne norme (International Organization for Standardization, 2021a, 2021b).

Posebno mesto ima orbitalni TIG avtomatiziran sistem, ki vrti gorilnik okoli cevi in natančno drži programirane parametre. To zagotavlja visoko ponovljivost, dosledno penetracijo in odlično sledljivost vsakega zvara—ključne prednosti v močno reguliranih okoljih, kot so farmacija, kemija ali jedrski sektor. V praksi se TIG pogosto kombinira z drugimi postopki: koren se izvede z TIG-om zaradi tesnosti in nadzora toplote, polnilne in pokrovne plasti pa se—zaradi produktivnosti—prevedejo na MMA ali MAG. Tak hibridni pristop skrajša čas izdelave, ne da bi ogrozil kakovost najkritičnejšega dela spoja (American Society of Mechanical Engineers, 2025).

Čeprav je TIG počasnejši in občutljivejši na zunanje pogoje kot MIG/MAG ali MMA, njegove prednosti na tlačnih sistemih ostajajo odločilne: natančno doziranje toplote, čist proces brez žilindre in brizganja, odlična kontrola mikrostrukture ter estetsko brezhibni, sanitarno sprejemljivi šivi. Z delom po kvalificiranih WPS, ustrezno pripravo robov in doslednim nadzorom parametrov zagotavlja zanesljive, trajno tesne in

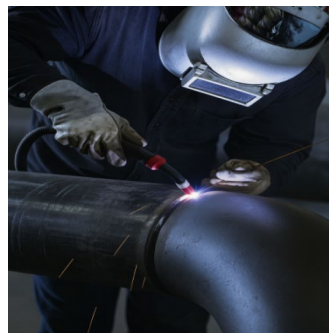
standardom skladne spoje, kar neposredno vpliva na varnost in življenjsko dobo visokotlačnih cevovodov.

V tabeli 4 so prikazane osnovne vrste volframovih elektrod za TIG varjenje ter njihove značilnosti in priporočena uporaba.

| Vrsta elektrode | Oznaka        | Barva        | Značilnosti                           | Priporočena uporaba                                |
|-----------------|---------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Čisti volfram   | WP            | Zelena       | Ni legirano, nižja emisija elektronov | Aluminij (AC), danes redko uporabljen              |
| Torij           | WT20          | Rdeča        | Vsebuje 2 % torija, odlična emisija   | DC varjenje jekla in nerjavečega jekla             |
| Lantan          | WL15/<br>WL20 | Zlata/ Modra | Večnamenski, stabilen lok             | TIG za vse materiale (jeklo, nerjaveče jeklo, Al)  |
| Cirkonij        | WZr           | Bela         | Dobra odpornost proti onesnaženju     | AC za aluminij, dobro čiščenje oksidov             |
| Hibrid          | E3            | Siva         | Okolju prijazno, univerzalna uporaba  | Zamenjava za torirano – jeklo, nerjaveče jeklo, Al |

Tabela 4: *Volframove elektrode za TIG varjenje*  
(Lastni vir)

Na sliki 13 je prikazan varilec pri izvajanju postopka TIG varjenja.



Slika 13: *TIG varilec*  
(Lastni vir)

### 3.4 Orbitalno varjenje visokotlačnih cevi

Orbitalno varjenje je specializirana, avtomatizirana različica TIG-varjenja, zasnovana za spoje, kjer so natančnost, ponovljivost, tesnost in sledljivost povsem neodtujljive zahteve. Namesto da gorilnik vodi varilec, se varilna glava programirano vrti okoli fiksne cevi in ohranja vnaprej določene parametre — tok, hitrost vrtenja, pretok plina, dolžine segmentov, čase zamikov in, po potrebi, sinhronizirano dodajanje žice. Ker je toplota odmerjena zelo enakomerno in je talina stalno zaščitena z inertnim plinom visoke čistosti, dobimo homogeno, čisto in ponovljivo geometrijo zvara, brez žilindre in brizganja, z minimalnim vplivom na mikrostrukturo v HAZ.

Ključ do zanesljive izvedbe je priprava spoja: konci cevi morajo biti natančno obdelani, razmaščeni, brez zarez in pravilno poravnani, reža pa strogo v toleranci. Po namestitvi orbitalne glave in preverjanju tesnjenja plinske zaščite se sproži program, ki reproducira izbrane korake varjenja. Pri tankostenskih ceveh se običajno vari brez dodatnega materiala (fuzijsko), pri večjih debelinah in premerih pa se uporablja avtomatski podajalnik žice, ki sledi profilu vrtenja. Sistem ves čas beleži parametre, tako da je vsak zvar dokumentiran in sledljiv, kar močno olajša validacije in inšpekcije v okoljih s strogimi regulativami (TWI, n.d.; International Organization for Standardization, 2017; International Organization for Standardization, 2021a, 2021b). Največ koristi prinaša v območju DN6–DN100 in pri debelinah sten do približno 3–4 mm, kjer ročni TIG hitro postane neenakomeren, MIG/MAG pa ne dosega zahtevane čistoče in tesnosti notranje površine. Prav zato je orbitalni postopek standard v farmacevtski in biotehnološki industriji (sanitarni cevovodi, GMP), v živilstvu (gladki, enostavno čistljivi šivi), v kemični in petrokemični industriji (odpornost na agresivne medije, temperaturne in tlačne cikle) ter v energetiki, vključno z jedrskimi sistemi, kjer varjeni spoji dolgoročno prenašajo visoke tlake in temperature. V teh aplikacijah je cilj 100-odstotna tesnost, zelo gladka notranja površina ter stabilna metalurgija brez por, podreza ali nepopolne penetracije (American Society of Mechanical Engineers, 2024c; TWI, n.d.; Minh et al., 2024).

Kljub prednostim ima tehnologija jasne zahteve in omejitve. Oprema je draga, občutljiva na okolje in zahteva stabilno napajanje, čist delovni prostor ter dobro usposobljeno osebje za programiranje, vzdrževanje in odpravljanje napak. Orbitalno varjenje slabo prenaša odstopanja geometrije (nepravilna poravnava, prevelika reža) in je manj primerno za zelo velike premere ali težko dostopne, nestandardne spoje, kjer ročne metode ostanejo bolj prožne. Zato se v praksi pogosto uporablja hibridni pristop: koren in kritični sloji se izvedejo orbitalno (zaradi tesnosti in ponovljivosti), polnilni ali zaključni prehodi pa s TIG/MMA, kadar to pospeši delo brez kompromisov pri kakovosti (TWI, n.d.; American Welding Society, n.d.-b).

Za visokotlačne sisteme je pomen orbitalnega varjenja dvojen: poleg vrhunske kakovosti šivov omogoča tudi popolno procesno dokumentacijo. Spoji so načrtovani in kvalificirani v skladu z WPS/PQR ter preverjeni po zahtevah EN ISO 3834, EN 13480 ali ASME B31.3 (odvisno od projekta), varilci in operaterji pa morajo biti usposobljeni po EN ISO 9606-1/14732. Sposobnost natančnega obvladovanja

toplotnega cikla, omejevanja HAZ in zagotavljanja idealno gladkih, tesnih in sanitarno sprejemljivih notranjih površin neposredno podaljšuje življenjsko dobo cevovodov, zmanjšuje tveganja puščanj in olajša kasnejše revizije ter validacije sistema (TWI, n.d.; American Welding Society, n.d.-b; Kou, 2003).

V tabeli 5 je prikazana primerjava ključnih procesnih značilnosti orbitalnega in ročnega TIG varjenja.

| <b>Vidik</b>               | <b>Orbitalno TIG</b>                                  | <b>Ročno TIG</b>                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Način vodenja              | Avtomatizirano; glava kroži po programu               | Varilec ročno vodi gorilnik in dodaja žico |
| Ponovljivost               | Zelo visoka, parametri se reproducirajo               | Odvisna od spretnosti in utrujenosti       |
| Produktivnost              | Visoka pri serijah/identičnih spojih                  | Boljša za posamična, različna dela         |
| Priprava spoja             | Zelo stroge tolerance (reža, poravnava, čistoča)      | Večja toleranca, varilec sproti prilagaja  |
| Okolje                     | Najbolje v hali/čistih pogojih                        | Možno tudi na terenu in v zahtevnih legah  |
| Obseg uporabe              | Najbolj DN6–DN100, tanke stene ( $\approx$ do 3–4 mm) | Širok obseg premerov in debelin            |
| Dodajni material           | Brez (fuzija) ali avtomatski podajalnik žice          | Ročno doziranje žice po potrebi            |
| Kakovost notranje površine | Zelo gladka, sanitarno primerna                       | Odvisna od varilca; več variacije          |
| Dokumentacija              | Samodejno beleženje parametrov, visoka sledljivost    | Ročni zapisi ali zunanji logger            |
| Stroški/oprema             | Visoki začetni stroški, zahtevno vzdrževanje          | Nižji stroški, mobilna in robustna oprema  |

Tabela 5: *Primerjalna tabela procesnih značilnosti orbitalnega in ročnega TIG-varjenja*  
(Lastni vir)

## 4 VARILNI PARAMETRI IN NJIHOV VPLIV NA KAKOVOST SPOJA

### 4.1 Parametri obločnega varjenja (MMA)

Pri MMA se hitro vidi, ali so parametri "zajeti" pravilno: šiv je miren, kopel se lepo polni in robovi so enakomerno omočni. V praksi se za konstrukcijska jekla uporabljajo toki 80–180 A, pri čemer višji tok pogloblja penetracijo, a poveča nevarnost prežiga in podreza, prenizek pa pušča nepopolno zlitje. Napetost 18–30 V vpliva na širino obloka in na mirnost prenosa kovine; previsoka napetost razširi talino in zmanjša globino, prenizka pa povzroča "trzav" oblok in slab videz površine. Hitrost varjenja 50–150 mm/min uravnava energijski vnos: prepočasno varjenje širi ZUT in ustvarja grobozrnatost, prehitro prinese "hladne" spoje.

Kakovost odločilno zaznamujejo vrsta toka in polarnost (za jekla DC, najpogosteje DCEN za globlje prodiranje), izbira elektrode in njen premer 2,0–4,0 mm. Rutilne (E6013) olajšajo vžig in dajo lep videz, celulozne (E6010/E6011) prebadajo koren v vseh položajih, bazične (E7018) pa znižajo difuzijski vodik in dvignejo žilavost – zato so standardna izbira za obremenjene spoje pod tlakom. Tudi dolžina obloka 2–5 mm in prekrivanje 30–50 % sta tipična "majhna regulatorja", s katerima se v praksi umiri profil šiva. Medpasovna temperatura 100–200 °C zadrži rast zrn v ZUT in zmanjša nevarnost razpokanja ob naslednjih prehodih. Ko so ti elementi uravnoteženi, je rezultat polna penetracija, ozka ZUT in zvar brez por, podrezov in prekrivanj (American Welding Society, n.d.-b; International Organization for Standardization, 2023).

## 4.2 Parametri MIG/MAG varjenja

MIG/MAG je hiter in produktiven postopek, a občutljiv na usklajenost toka (80–250 A), napetosti (16–26 V) in podajanja žice (3–15 m/min). Višji tok in pravilno podajanje povečata količino taline in globino, vendar kombinacija previsokih vrednosti hitro prinese preboje in deformacije. Napetost neposredno kroji širino in "mirnost" obloka: prenizka povzroča "suho" kopel in slabo omočenje roba, previsoka pa utrdi kapljični prenos in poveča brizganje. Hitrost varjenja 25–70 cm/min vpliva na širino ZUT in ekonomiko: prehitra izvedba prinese plitvo penetracijo in slab koren, prepočasna pa pregrevanje in valovitost.

Premer žice 0,8–1,6 mm izberemo po debelini in zahtevani penetraciji, dolžina izstopa 10–20 mm stabilizira oblok, pretok plina 10–20 l/min pa mora zagotoviti čisto kopel. Za ogljikova jekla je pogosta mešanica Ar/CO<sub>2</sub> (npr. 82/18), pri nerjavnih jeklih in Al pa inertni plini zaradi čistosti površine. Nezdosten pretok povzroči poroznost in oksidacijo, previsok ustvarja vrtince in vsesava zrak. Položaji PA, PB, PF, PE narekujejo prilagoditve: navpično in nadglavno zahtevata nižji energijski vnos ter krajši oblok, da staljena kovina ne "teče". Pri debelinah 1–20 mm (pogosteje do 10 mm) se običajno delamo v 1–3 prehodih, da ostane profil enakomeren in ZUT zmeren (International Organization for Standardization, 2017; American Society of Mechanical Engineers, 2025; International Organization for Standardization, 2021a, 2021b).

## 4.3 Parametri TIG varjenja

TIG je "natančni" postopek, kjer parametri neposredno določijo čistočo in estetiko šiva. Varilni tok 15–350 A kroji globino in količino taline; prenizek tok pomeni nepopolno zlitje, previsok pa podrez in oksidacijo, zlasti pri nerjavnih jeklih. Napetost 10–20 V in dolžina obloka 1–3 mm naj ostaneta kratka in mirna, da je kopel ozka, kontrolirana in z minimalnim toplotnim vplivom. Hitrost 15–40 cm/min uravnava energijski vnos: prehitra da plitko penetracijo, prepočasna razširi ZUT in zniža žilavost.

Dodajna žica 1,0–3,2 mm in volfram 1,0–4,0 mm morata slediti debelini in toku. DCEN je standard za jekla, AC je nujen za aluminij zaradi čiščenja oksidne plasti. Pri nerjavnih jeklih (npr. 316L) je zaščita s Ar najbolj pogosta; dodatek H<sub>2</sub> v majhnih deležih lahko pospeši "zglajevanje" in dvigne čistost videza, He pa pomaga pri globljem prodiranju debelejših sten. Pretok 4–18 l/min mora zaščititi talino brez turbulence. Nadzirana medpasovna temperatura 100–200 °C prepreči rast zrn in ohranja udarno žilavost ZUT. Če je priprava roba natančna, je rezultat zelo čist, ozko profiliran šiv s polno penetracijo in odličnim videzom (Kou, 2003; ASM International, n.d.; International Organization for Standardization, 2017).

#### 4.4 Parametri orbitalnega varjenja

Pri orbitalnem varjenju odločajo dosledno programiranje in ponovljivost: tok 15–180 A, napetost 10–20 V, programirana dolžina obloka 1–3 mm, hitrost vrtenja glave 100–200°/min in sinhronizirano podajanje žice 50–150 mm/min morajo “držati tempo” okoli celotnega oboda. Prehitra rotacija pusti nepopolno zlitje in prekrivanja, prepočasna prinese pregrevanje in razširjeno kopel (TWI, n.d.; Minh et al., 2024).

Za nerjavne cevi je standard argon visoke čistosti (99,999 %) ali Ar+He, pretok 5–20 l/min in nujno pred- in poplinjenje 0,5–5 s, da začetki/konci ne oksidirajo. Pri daljših ciklih vodno hlajenje glave ohranja parametre in ščiti gorilnik; običajno je cev fiksna, rotira glava – tako se doseže natančnost in ponovljivost. Pri debelejših stenah delo razdelimo v 1–3 prehode, s čimer izboljšamo metalurgijo in nadzor nad profilom.

#### 4.5 Vpliv sprememb parametrov na strukturo in kakovost varjenega spoja

Parametri neposredno določajo toplotni vnos, hitrost ohlajanja in kristalizacijo, to pa se odrazi v velikosti zrn, razmerjih faz in preostalih napetostih. Prevelik vnos toplote širi ZUT, spodbuja rast zrn in lahko tvori krhke mikrostrukture (pri nekaterih jeklih tudi martenzitna “otočja”); prenizek vnos pomeni nepopolno zlitje in “hladne” spoje. Napetost in dolžina obloka obvladujeta širino taline in stabilnost; hitrost določa penetracijo in kompakten koren. Vrsta in pretok plina sta ključna za poroznost, oksidacijo in barvo površine – podhranjen pretok pušča pore, pretiran ustvarja turbulenco.

Pri nerjavnih jeklih je cilj ozek ZUT, homogena austenitna matrica z nadzorovanim feritom v šivu, majhna razpršenost trdote in odsotnost tipičnih napak (poroznost, podrez, nepreboj). To dosežemo s kombinacijo: primeren tok/napetost, kratka dolžina obloka, usklajen tempo (MMA 50–150 mm/min; MIG/MAG 25–70 cm/min; TIG 15–40 cm/min) ter pravilen pretok plina (MIG/MAG 10–20 l/min; TIG 4–18 l/min; orbitalno 5–20 l/min). Rezultat je polna penetracija, enakomeren profil, ozka ZUT in majhna variabilnost trdote med šivom, ZUT in osnovnim materialom – torej stabilen proces in ponovljiv industrijski nivo kvalitete (International Organization for Standardization, 2016; International Organization for Standardization, 2017; International Organization for Standardization, 2023).

## 5 OPTIMIZACIJA PARAMETROV VARILNEGA PROCESA

### 5.1 Uvod v optimizacijo procesov

V sodobni industrijski praksi, zlasti na področju visokotlačnih cevovodnih sistemov, postaja optimizacija varilnega procesa ključna komponenta pri zagotavljanju kakovosti, trajnosti in zanesljivosti varjenih spojev. Izraz optimizacija v tem kontekstu pomeni sistematično določanje in prilagajanje varilnih parametrov, da se doseže najboljša možna kombinacija mikrostrukture, mehanskih lastnosti in proizvodne učinkovitosti. Glavni cilji optimizacije vključujejo doseganje visokokakovostnih zvarov brez napak, zmanjšanje preostalih napetosti, nadzor dovoda toplote, boljše ponovljivost v serijski proizvodnji ter zmanjšanje stroškov in proizvodnega časa. Optimizacija zagotavlja tudi enakomernost varjenih spojev, kar je še posebej pomembno pri avtomatiziranih in kritičnih aplikacijah, kot je orbitalno varjenje. Orbitalno varjenje, ki se vse pogosteje uporablja v farmacevtski, živilski, energetski in jedrski industriji, je zelo natančen in avtomatiziran postopek, pri katerem se gorilnik vrti okoli oboda stacionarne cevi. Ker je postopek popolnoma avtomatiziran, zahteva izjemno natančno določene parametre, ki se vnesejo v vnaprej programirane cikle. Že minimalna odstopanja parametrov, kot so tok, hitrost vrtenja, čas osvetlitve ali položaj elektrode, lahko povzročijo nesprijemljive napake – poroznost, nezadostno penetracijo ali spremembe mikrostrukture v območju vpliva toplote (HAZ). Optimizacija pri orbitalnem varjenju torej ne vključuje le prilagajanja osnovnih parametrov (npr. jakosti toka, hitrosti varjenja, napetosti, pretoka zaščitnega plina), temveč tudi napredne simulacije toplotnega toka in deformacij z uporabo programskih orodij, kot so Simufact, SYSWELD ali ANSYS. S temi orodji je mogoče simulirati dejanski proces in napovedati vpliv sprememb posameznih spremenljivk na končni videz in lastnosti zvara. V literaturi je poudarjeno tudi, da ni univerzalne kombinacije parametrov – vsaka aplikacija zahteva individualen pristop, ki vključuje testiranje vzorcev, uporabo načrtovanja poskusov (DOE) ali metode Taguchi za identifikacijo ključnih dejavnikov in opredelitev optimalnih vrednosti. Uporaba takšnih metod je na primer privedla do zmanjšanja poroznosti pri TIG varjenju nerjavnih jekel za kar 30 %, hkrati pa se je povečala žilavost in odpornost proti koroziji. Kakovost varjenega spoja je v veliki meri odvisna od pravilne kombinacije vseh parametrov, saj skupaj določajo vnos toplote, mikrostrukturne spremembe in pojav napak. V visokotlačnih sistemih – kjer je tesnost zvara dobesedno vprašanje varnosti in funkcionalnosti celotnega sistema – je optimizacija nujna faza vsakega načrtovanja in izvedbe del. Napake v parametrih lahko povzročijo ne le finančne izgube, temveč tudi resne tehnične in varnostne posledice, zlasti pri visokotlačnih spojih, ki delujejo v neprekinjenih ali cikličnih obremenitvenih režimih (ASME, 2024a, 2024b; ISO, 2021b).

## 5.2 Optimizacijske metode

Optimizacija pomeni, da proces vodimo na podlagi podatkov, ne občutka. Pri varjenju to pomeni, da usklajeno nastavimo tok, napetost, hitrost napredovanja, dolžino loka, vrsto in pretok zaščitnega plina, interpasno temperaturo ter geometrijo priprave roba. Cilj ni "največ toplote", temveč stabilna penetracija brez prežganin, ozko in nadzorovano toplotno vplivano območje, minimalna poroznost in geometrijsko pravilen šiv, ki se ponovi zvara za zvarem. V visokotlačnih in sanitarnih aplikacijah se temu doda še zahteva po popolni tesnosti in gladki notranji površini.

Taguchijev pristop je hiter način, da iz množice možnosti izluščimo, kateri parametri največ prispevajo k razliki v kakovosti. Z majhnim številom dobro izbranih poskusov preverimo več nastavitev hkrati in za vsak rezultat ocenimo, kako stabilen je (ne le povprečje, tudi raztros). Tako hitro ugotovimo, ali več k stabilnosti prispeva tok v določeni fazi, dolžina loka, pretok plina ali recimo hitrost vrtenja pri orbitalnem TIG-u. Namen je izbrati kombinacijo, ki daje dober rezultat tudi, ko se pogoji malo spremenijo (npr. temperatura okolja, odstopanje v pripravljenosti roba) (Kou, 2003; ASM International, n.d.; American Welding Society, n.d.).

Faktorialna zasnova poskusov (DOE) poglobi sliko. Omogoča, da vidimo ne samo učinek vsakega parametra posebej, temveč tudi njihove kombinacije. V praksi se pogosto pokaže, da tok sam po sebi ni "kriv" za napako, temveč tok v kombinaciji s preveliko hitrostjo ali neustreznim pretokom plina. S faktorialnim načrtom zgradimo uporabno "mapo" procesa: kje je varno območje, kje se začnejo pojavljati podrezi, kje postane HAZ preširok, kje raste tveganje za pore. Rezultat je nastavitveni "recept", ki ga lahko zapišemo v WPS in razložimo operaterju (International Organization for Standardization, 2017; American Society of Mechanical Engineers, 2025).

Simulacije so tretji steber in pridejo prav, ko je drag vsak napačen korak ali ko dostop do zvara ni trivialen (npr. orbitalno varjenje tankostenskih cevi). Z digitalnim modelom preverimo porazdelitev toplote, hitrosti ohlajanja, preostale napetosti in deformacije, še preden se karkoli dejansko vari. Model umerimo z nekaj merjenji in ga uporabimo za "virtualne poskuse": preigravamo val obremenjevanja pri pulznem TIG-u, delitev obhoda na sektorje, prehode med programi, pretoke plina in oblike šob. Prednost je dvojna: skrajša se število fizičnih poskusov, hkrati pa dobimo vpogled v stvari, ki jih s prostim očesom ne vidimo (npr. lokalne konice temperature na korenu) (Hexagon AB, n.d.; Keysight Technologies, n.d.).

Kaj vse vključimo v optimizacijo v praksi:

- pripravo roba (kot, višina korena, reža, poravnava, čistost — tudi notranja površina pri sanitarnih ceveh),
- parametre procesa po fazah (npr. začetek, prehod, pokrov) in njihovo dovoljeno okno,
- interpasno temperaturo in zaporedje prehodov, da se toplotni cikli ne kopičijo,
- izbiro dodatnega materiala in plina, skladno z osnovnim materialom in zahtevano čistostjo,

- disciplino sušenja in rokovanja z elektrodami (MMA) ter plinsko zaščito in stabilnost obloka (TIG/MIG/MAG),
- način beleženja parametrov in osnovni statistični nadzor v seriji (da ne "zdrsne" iz izbranega okna).

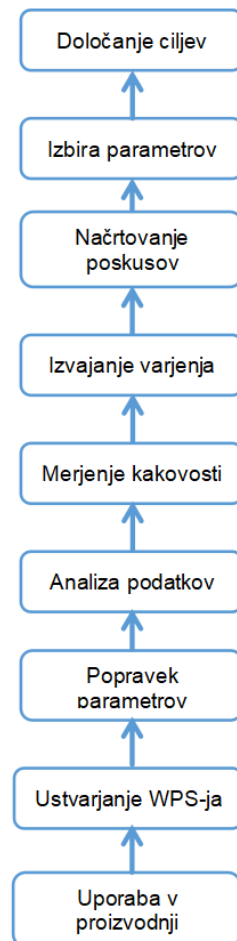
Primer logike na orbitalnem TIG-u:

Za nerjavno cev majhnega premera najprej z nekaj poskusi ugotovimo, ali je kritičen prehod med sektorji. Taguchi pokaže, da stabilnost najbolj izboljša kombinacija ustreznega pretoka plina in nekoliko krajše dolžine loka v teh prehodih. DOE potem potrdi, da se ob določeni hitrosti vrtenja tveganje poroznosti zmanjša, če v kratkem intervalu pred in po prehodu prilagodimo tok. Simulacija nazadnje pokaže, da tako ostane toplotno vplivano območje ozko, koren pa ne pregreva. Vse skupaj zapišemo kot program: definiran začetek, prehodi, pokrov, plin, časi in dovoljene meje odstopanj. Rezultat je ponovljiv, čist zvar in preizkus tesnosti brez presenečenj.

Validacija in obratovanje:

Optimizirane nastavitve vnesemo v WPS, preverimo z WPQR in vključimo v delo. V proizvodnji spremljamo nekaj enostavnih indikatorjev (npr. širina zvara, poraba žice, čas cikla, interpasna temperatura) in jih vodimo skozi kontrolne točke. Če se kazalniki premaknejo, proces popravimo, ne čakamo na napako v NDT. V sanitarnih in visokotlačnih sistemih dodamo še endoskopski pregled notranje površine in dokumentirano sledljivost parametrov ter osebja.

Na sliki 14 je prikazan diagram poteka optimizacije varilnega procesa, ki zajema zaporedne korake od določitve ciljev do uporabe optimiziranih parametrov v proizvodnji.



Slika 14: *Diagram optimizacije varilnega procesa*  
(Lastni vir)

V tabeli 6 so prikazani izbrani primeri optimizacije varilnih procesov iz industrijske prakse z uporabo različnih metod optimizacije.

| Primer                                 | Optimizacijska metoda                               | Postopek varjenja | Material / spoj                       | Optimizirani parametri                                              | Doseženi rezultati                                                             |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. TIG varjenje nerjavnega jekla       | Taguchijeva metoda (L9)                             | TIG               | Avstenitno nerjavno jeklo             | Tok, hitrost varjenja, pretok plina, dolžina loka                   | Višja penetracija, manj poroznosti, bolj homogena mikrostruktura               |
| 2. MIG varjenje aluminija              | Faktorialno načrtovanje                             | MIG               | Aluminij                              | Vrsta žice, tok, napetost, hitrost varjenja                         | Večja trdnost zvara, manj utrujenostnih poškodb in podrezov                    |
| 3. Orbitalno – farmacevtska industrija | Simulacija (npr. Simufact)                          | Orbitalni TIG     | Cevi DN25 × 1,6 mm, AISI 316L         | Hitrost vrtenja, varilni tok, dolžina loka, pretok zaščitnega plina | 100 % tesnost, enakomerna geometrija, brez naknadne obdelave notranje površine |
| 4. Visokotlačne parne cevi             | Kombinacija DOE + numerična simulacija (npr. ANSYS) | TIG ali TIG/MMA   | Visokotlačne parne cevi (160–320 bar) | Tok, napetost, hitrost varjenja                                     | ≈ 20 % manj preostalih napetosti, znižana trdota v HAZ                         |

Tabela 6: Optimizacija iz prakse  
(Lastni vir)

## 6 MATERIALI, VARJENJE IN METALURGIJA

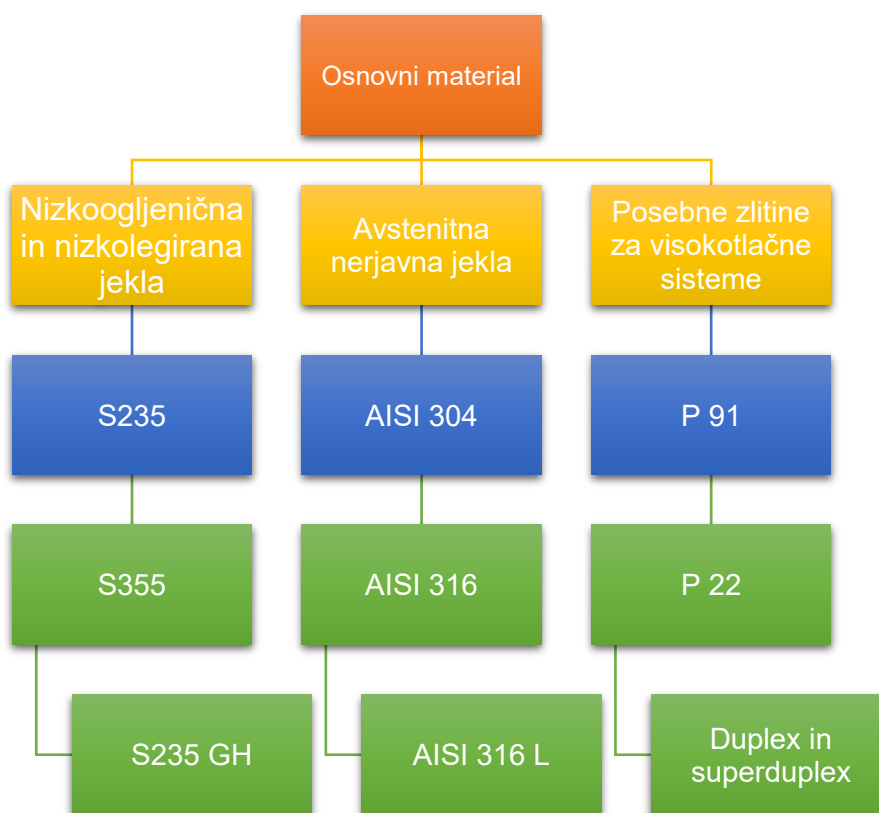
### 6.1 Osnovni materiali in njihove značilnosti

Izbira osnovnega materiala ima ključno vlogo na celoten postopek varjenja, pa tudi na kakovost, trajnost in funkcionalnost varjenega spoja. Materiali, ki se najpogosteje uporabljajo v visokotlačnih cevovodih, farmacevtski, živilski in energetski industriji, morajo izpolnjevati številne zahteve – vključno z odpornostjo na visoke temperature in tlake, odpornostjo proti koroziji, varivostjo in stabilnimi mehanskimi lastnostmi po varjenju.

- *Nizkoogljčna in nizkolegirana jekla:* Nizkoogljčna jekla (vsebnost ogljika do 0,25 %) se pogosto uporabljajo zaradi dobre varivosti, nizkih stroškov in stabilne mikrostrukture. Njihova prednost je minimalna dovzetnost za razpoke in dobra odpornost proti hladnim razpokam, zlasti če se uporabljata predgrevanje in ustrezen nadzor temperature med sloji. Tipični primeri vključujejo jekla razredov S235, S355 ali P235GH, ki se pogosto uporabljajo za kotlovske sisteme in tlačne posode. Nizkolegirana jekla (z dodatkom Cr, Mo, Mn ali Ni) ponujajo izboljšane mehanske lastnosti in odpornost na visoke temperature. Vendar pa lahko njihovo varivost ovira nagnjenost k tvorbi utrjenih struktur v HAZ. Pri teh materialih je pravilna izbira varilnih parametrov, dodatnih materialov in toplotne obdelave po varjenju (PWHT) ključnega pomena za doseganje zadovoljive kakovosti spoja (Milosavljević & Đorđević, 2000; Kou, 2003).
- *Nerjaveča jekla:* Nerjaveča jekla, zlasti avstenitne vrste, kot so AISI 304, 316 in 316L, se pogosto uporabljajo v cevovodih, kjer sta potrebni visoka korozijska odpornost in čistoča medijev. Avstenitna mikrostruktura zagotavlja odlično odpornost na kisline in druge agresivne kemikalije, pa tudi dobro duktilnost in odpornost proti udarcem, tudi pri nizkih temperaturah. Varjenje nerjavnih jekel zahteva posebno pozornost zaradi možnosti medkristalne korozije (zaradi izločanja karbida na mejah zrn) in sprememb v sestavi, kot je zmanjšanje vsebnosti kroma v varilnem območju. Uporaba nizkoogljčnih sort (npr. 316L) in dodatnih materialov, stabiliziranih z niobijem ali titanom, lahko prepreči ta pojav. Avstenitna jekla lahko vsebujejo tudi določen odstotek delta-ferita, ki izboljša odpornost proti vročim razpokam, vendar ga je treba nadzorovati, da se ne poslabša korozijska odpornost (Lippold & Kotecki, 2005; Kou, 2003).
- *Posebni materiali za visokotlačne cevovode:* V sistemih, ki delujejo pod visokim tlakom in temperaturo (npr. 160–320 barov,  $T > 400$  °C), se uporabljajo posebna perlitna in martenzitna jekla (npr. P91, P22), ki zahtevajo strog nadzor varilnega procesa. Ti materiali imajo povečano trdnost in odpornost proti lezenju, vendar

so izjemno občutljivi na pojav trdih, krhkih con v HAZ, če varjenje ni izvedeno v skladu s specifikacijami. V teh primerih je obvezna toplotna obdelava po varjenju (PWHT). V sterilnih in sanitarno zahtevnih okoljih (farmacevtska in živilska industrija) so cevi in fittingi najpogosteje izdelani iz jekla AISI 316L, kjer se za doseganje popolne čistoče, gladkosti in tesnosti spoja uporablja orbitalno varjenje. Takšni materiali zahtevajo uporabo visokokakovostnih polnilnih materialov (npr. žice ER316L) in natančen nadzor parametrov .

Na sliki 15 je prikazana razvrstitev osnovnih materialov glede na vrsto in njihovo uporabo pri varjenju.



Slika 15: Razvrstitev osnovnih materialov glede na vrsto in uporabo pri varjenju (Lastni vir)

## 6.2 Dodatni varilni materiali

Dodatni material ni le polnilo, ampak glavno orodje za vodenje kemije taline in s tem mikrostrukture, žilavosti, korozijske odpornosti ter tesnosti spoja. Izbira se zato vedno opira na združljivost in standarde: za nerjavna jekla EN ISO 14343 (AWS A5.9), za ne-/nizkolegirana EN ISO 14341/2560 (AWS A5.18/A5.1), za nikljeve zlitine AWS A5.14, s sledljivostjo po EN 10204 3.1; v farmacevtskih/sanitarnih sistemih še z upoštevanjem ASME BPE in zahtev notranje hrapavosti. Matching ali rahlo over-matching žice (npr. ER308L za 304, ER316L/ER316LSi za 316L) ohranjajo korozijsko odpornost; LSi z dodatkom Si izboljša omočenje in enakomernost, kar je ključno pri orbitalnem TIG-u. Za dissimilar spoje (npr. 316L-CS ali 316L-dupleks) se pogosto uporabijo Ni-bazne žice (npr. ERNiCrMo-3) kot "butter" ali glavni filler.

Pri dupleksu/superdupleksu filerja ER2209/ER2594 pomagata držati pravo razmerje avstenit/ferrit; dodatek N v zaščitni ali hrbtni plin prepreči osiromašenje avstenita. Za P/T Cr-Mo jekla izbiramo B2/B3 fillerje (ER80S-B2, E8018-B2), skladne s PWHT; za nizke temperature žice z dokazano udarno žilavostjo. Vodik ostaja kritičen: nizkovodikove elektrode (E7018/E7016) in čiste TIG/MIG žice z nizkim S/P znižajo tveganje hladnih razpok—a le ob strogi higieni priprave, reza in skladiščenja. V farmacevtskih spojih je ključen nizek  $O_2$  v hrbtnem plinu (projektno določen), sicer notranja barva/oksidi slabijo sanitarno in korozijsko odpornost.

Geometrija in razredčitev sta neločljivi: prevelika reža ali počasno varjenje razredči kovino zvara izven ciljnih kemij. Pri orbitalnem fuzijskem TIG-u brez žice to odpadne, a je zato nujna čistost in dosleden program; ob doziranju žice morajo biti premer, lega in čas usklajeni z dolžino loka in hitrostjo vrtenja. Na koncu mora biti "dober izbor" tudi dokumentiran: certifikati serij, sledljivost, ter po varjenju ustrezno jedkanje/pasivacija, endoskopija in po potrebi helium test—še le tako izbrani dodajni material res zagotovi trajno tesnost in zanesljivost British Standards Institution, 2020; ASTM International, n.d.; American Society of Mechanical Engineers, 2024d).

V tabeli 7 je prikazan pregled dodatnih varilnih materialov glede na posamezni postopek varjenja in osnovni material.

| Postopek varjenja | Oblika dodatnega materiala      | Tipični materiali                | Uporaba                      | Prednosti                          |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| TIG               | Žica (npr. ER316L)              | Nerjaveča jekla                  | Farmacija, prehrana          | Visoka čistost, natančen var       |
| MMA               | Obložena elektroda (npr. E7018) | Ogljikova in nizkolegirana jekla | Gradbeništvo, tlačni sistemi | Primerno za delo na terenu         |
| MIG/MAG           | Žica (npr. G3Si1, ER70S-6)      | Ogljikova jekla, nerjaveče jeklo | Serijska proizvodnja         | Visoka hitrost delovanja           |
| Orbitalni TIG     | Precizna žica (npr. ER316LSi)   | AISI 316L in podobno             | Farmacija, prehrana          | Estetika, ponovljivost, natančnost |

Tabela 7: Pregled dodatnih varilnih materialov – po postopku in osnovnem materialu  
(Lastni vir)

### 6.3 Metalurški procesi med varjenjem

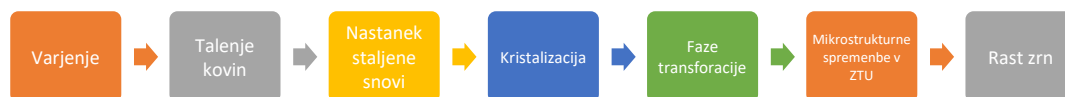
Varjenje ni zgolj tehnologija spajanja, temveč hiter termometalurški proces, v katerem se v osnovnem in dodajnem materialu v zelo kratkem času in pri izjemnih temperaturah (tudi >6000 °C) odvijajo intenzivne fizikalno-kemične spremembe. Najprej nastane talina, ki se po odstranitvi vira toplote strjuje; med kristalizacijo prihaja do segregacij, neenakomernega ohlajanja in nastajanja različnih faznih sestav. Hitrost ohlajanja – odvisna od materiala, geometrije spoja in parametrov – določa, ali bo v zvaru prevladoval ferit, perlit, avstenit, martenzit ali bainit, s čimer neposredno vpliva na žilavost, trdoto, korozijsko odpornost in tesnost (Kou, 2003; ASM International, n.d.).

Ob zvaru leži toplotno vplivano območje (ZUT), ki se ne stali, a doživi rast zrn, rekristalizacijo in fazne pretvorbe. Neprimerne nastavitve lahko povzročijo grobozrnate, krhke strukture oziroma martenzit v ZUT, kar poveča notranje napetosti in nagnjenost k razpokam. Pri nerjavnih jeklih dodatno skrb vzbujajo izločki karbidov in nitridov na mejah zrn: vezava kroma v karbide zniža lokalno korozijsko odpornost in lahko sproži medkristalno korozijo.

Te pojave obvladujemo z ustrezno izbiro parametrov (tok, napetost, hitrost, dolžina loka, zaščitni in hrbtni plin), pravilno pripravo roba ter po potrebi s predgrevanjem in naknadno toplotno obdelavo (PWHT), ki omejitata rast zrn in stabilizirata mikrostrukturo.

Dobro razumevanje transformacij v zvaru in ZUT omogoča, da izberemo primerne materiale in parametre ter dosežemo homogen, trden in dolgoročno zanesljiv spoj, skladen s tehničnimi in varnostnimi merili (ASME, 2024a, 2024b; ISO 3834-1, 2021; ISO 3834-2, 2021).

Na sliki 16 je prikazano zaporedje metalurških procesov, ki potekajo v zvaru in območju toplotnega vpliva (ZUT) med varjenjem.



Slika 16: Zaporedje metalurških procesov med varjenjem  
(Lastni vir)

## 6.4 Metalurške napake v varjenih spojih

Tudi pri najsodobnejših postopkih je vsak varjeni spoj izpostavljen metalurškim napakam, ki niso vedno vidne s prostim očesom, a lahko resno ogrozijo mehansko zanesljivost, tesnost, odpornost proti utrujenosti in koroziji – posebej v visokotlačnih in varnostno občutljivih sistemih. Izvirajo iz hitrih termičnih ciklov in kompleksnih fizikalno-kemijskih pojavov v zvaru in ZUT (HAZ): segregacij, vnosa plinov, nečistoč ter faznih in mikrostrukturnih sprememb. Tudi ob pravilno ujemajočih se materialih in idealnih parametrih lahko že nepopolna zaščita pred atmosfero ali neugodni pogoji (vlaga, preprih) sprožijo neželene učinke (ISO 5817, 2023; American Welding Society, n.d.).

Med najpogostejšimi napakami je poroznost – ujete plinske mehurčke v kovini, ki nastanejo zaradi vlage, olj, nečistoč ali slabe plinske zaščite. Poroznost znižuje trdnost, poveča prepustnost in pospeši korozijo. Razpoke so vroče (v poltekočem stanju zaradi segregacij in napetostnih razlik) ali hladne, ki nastanejo po ohladitvi zaradi preostalih napetosti in difuznega vodika; slednje so posebej nevarne, ker se širijo po ZUT in pogosto ostanejo skrite. Nezdostna penetracija izvira iz prenizkega toka, prehitrate hitrosti ali slabe priprave roba in vodi v delno spojene prereze z omejeno nosilnostjo. Podrez nastane kot vzdolžni utor ob zvaru zaradi prehitrega gibanja ali previsokega toka in deluje kot koncentrador napetosti. Vključki žlindre so tipični pri večprehodnem varjenju, če žlindre med prehodi ne odstranimo ali se talina prezgodaj strdi; zmanjšujejo homogenost in so izhodišča za lom (ISO 15614-1, 2017; ASME, 2025; ISO 3834-2, 2021).

Nadzor napak temelji na celostnem pristopu: čista in pravilno pripravljena površina ter robovi, stabilna in ustrezna zaščitna atmosfera (tudi hrbtni plin), natančno vodenje

parametrov po kvalificiranem WPS, izbira primernega dodatnega materiala in disciplina pri postopkih sušenja/hranjenja potrošnega materiala. Kjer je tveganje največje – denimo pri orbitalnem varjenju v farmacevtski industriji – se kakovost zagotavlja s strogim pregledom in dokumentacijo: VT, endoskopski pregled notranje površine, po potrebi RT/UT/PT ter tlačni oziroma heliumskih preizkus tesnosti. Tako se napake odkrijejo in odpravijo, še preden postanejo varnostni problem (ISO 3834-1, 2021; ISO 3834-2, 2021).

## 6.5 Primeri težav, specifičnih za material

Tudi pri najsodobnejših postopkih je vsak varjeni spoj izpostavljen metalurškim napakam, ki niso vedno vidne s prostim očesom, a lahko resno ogrozijo mehansko zanesljivost, tesnost, odpornost proti utrujenosti in koroziji – posebej v visokotlačnih in varnostno občutljivih sistemih. Izvirajo iz hitrih termičnih ciklov in kompleksnih fizikalno-kemijskih pojavov v zvaru in ZUT (HAZ): segregacij, vnosa plinov, nečistoč ter faznih in mikrostrukturnih sprememb. Tudi ob pravilno ujemajočih se materialih in idealnih parametrih lahko že nepopolna zaščita pred atmosfero ali neugodni pogoji (vlaga, preprih) sprožijo neželene učinke.

Med najpogostejšimi napakami je poroznost – ujete plinske mehurčke v kovini, ki nastanejo zaradi vlage, olj, nečistoč ali slabe plinske zaščite. Poroznost znižuje trdnost, poveča prepustnost in pospeši korozijo. Razpoke so vroče (v poltekočem stanju zaradi segregacij in napetostnih razlik) ali hladne, ki nastanejo po ohladitvi zaradi preostalih napetosti in difuznega vodika; slednje so posebej nevarne, ker se širijo po ZUT in pogosto ostanejo skrite. Nezdostna penetracija izvira iz prenizkega toka, prehitrate hitrosti ali slabe priprave roba in vodi v delno spojene prereze z omejeno nosilnostjo. Podrez nastane kot vzdolžni utor ob zvaru zaradi prehitrega gibanja ali previsokega toka in deluje kot koncentrador napetosti. Vključki žlindre so tipični pri večprehodnem varjenju, če žlindre med prehodi ne odstranimo ali se talina prezgodaj strdi; zmanjšujejo homogenost in so izhodišča za lom (ASME, 2025; Kou, 2003).

Nadzor napak temelji na celostnem pristopu: čista in pravilno pripravljena površina ter robovi, stabilna in ustrezna zaščitna atmosfera (tudi hrbtni plin), natančno vodenje parametrov po kvalificiranem WPS, izbira primernega dodatnega materiala in disciplina pri postopkih sušenja/hranjenja potrošnega materiala. Kjer je tveganje največje – denimo pri orbitalnem varjenju v farmacevtski industriji – se kakovost zagotavlja s strogim pregledom in dokumentacijo: VT, endoskopski pregled notranje površine, po potrebi RT/UT/PT ter tlačni oziroma heliumskih preizkus tesnosti. Tako se napake odkrijejo in odpravijo, še preden postanejo varnostni problem (ISO 15614-1, 2017; ASME, 2025; ISO 17635, 2016; ISO 17637, 2016; ISO 17640, 2018; ISO 17636-1, 2022; ISO 3452-1, 2021; ISO 3834-2, 2021).

## 7 PREIZKUŠANJE KAKOVOSTI VARJENIH SPOJEV

Varjeni spoj, ne glede na uporabljeno tehnologijo in materiale, mora izpolnjevati visoke zahteve glede mehanske trdnosti, tesnosti, strukturne homogenosti in dolgoročne zanesljivosti. Da bi zagotovili, da varjeni spoji ustrezajo specifikacijam, predpisanim s tehnično dokumentacijo in standardi, je treba izvajati sistematično testiranje njihove kakovosti. V panogah, kot so energetika, farmacija, živilska in kemična industrija – kjer morajo varjeni spoji prenesti visoke tlake, agresivne medije in sterilne pogoje – je nadzor kakovosti varjenih spojev ključni korak v celotnem proizvodnem in montažnem procesu. Testiranje kakovosti ni le končni pregled, temveč sestavni del celotnega varilnega procesa, ki se začne že v fazi načrtovanja, nadaljuje s spremljanjem med samim procesom in konča z analizo izdelanih spojev. Na ta način se zagotovi zanesljivost sistema, zmanjša tveganje za okvare ter zmanjšajo stroški vzdrževanja in izpadi. Metode testiranja kakovosti varjenih spojev se delijo na destruktivne (destruktivne) in nedestruktivne (nedestruktivne). Medtem ko destruktivne metode vključujejo fizično uničenje vzorca za analizo njegove notranje strukture in mehanskih lastnosti, nedestruktivne metode omogočajo pregled zvarov brez njihove poškodbe, zaradi česar so primerni za preskušanje v serijski proizvodnji in v konstrukcijah, ki morajo ostati nedotaknjene. To poglavje bo obravnavalo najpomembnejše metode nadzora kakovosti, ki se uporabljajo v industrijski praksi, s posebnim poudarkom na visokotlačnih cevovodnih sistemih. Podrobno bodo predstavljeni vizualni pregled, radiografski pregled, ultrazvočni pregled, penetracijske in magnetne metode ter standardi, ki določajo sprejemljivost varjenih spojev.

## 7.1 Nedestruktivno preskušanje zvarov

Nedestruktivno preskušanje varjenih spojev (NDT - Non-Destructive Testing) predstavlja osnovo nadzora kakovosti v sodobnih industrijskih sistemih, zlasti ko gre za varjene spoje pod visokim tlakom, kjer je varnost konstrukcije ključnega pomena. Te metode omogočajo odkrivanje površinskih in notranjih napak brez uničenja preskušene vzorca, zaradi česar so idealne za nadzor končnih izdelkov in za uporabo med procesom zagotavljanja kakovosti.

*Vizualni pregled (VT):* Vizualni pregled (EN 970) je prva in najpreprostejša faza nadzora kakovosti varjenega spoja. Izvede se takoj po varjenju in se pogosto uporablja kot predhodna metoda pred uporabo naprednejših tehnik. Pregled se izvaja pri ustrezni osvetlitvi (najmanj 350 lx, priporočeno 500 lx) z dodatno opremo, kot so povečevalna stekla in svetilke. Pregled ugotavlja površinske nepravilnosti: podrezanje, poroznost, nepravilno geometrijo, prekrivanja in nehomogene prehode med varjenim spojem in osnovnim materialom (EN ISO 17637:2016).

Na sliki 17 je prikazan primer izvajanja vizualnega pregleda (VT) varjenega spoja z uporabo povečevalnega stekla in ustrezne osvetlitve.



Slika 17: *Vizualni pregled*  
(Lastni vir)

- *Penetracijski test (PT):* Penetrantno testiranje temelji na kapilarnem učinku. Površina se najprej očisti in nanese kapilarna tekočina (penetrant), ki prodre v napake širine  $> 0,01$  mm in globine  $> 0,03$  mm. Po določenem času stika (10–15 minut) se tekočina odstrani in nanese razvijalec, ki iz napak izvede penetrant, zaradi česar so vidne. V praksi se uporabljajo tako fluorescentni kot barvni penetranti, odvisno od pogojev pregleda. Metoda je še posebej učinkovita za odkrivanje majhnih površinskih razpok in poroznosti v materialih, kot so nerjavna jekla, aluminij in plastika (ISO 3452-1:2021).

Na sliki 18 je prikazan postopek penetracijskega testiranja (PT).



Slika 18: *Penetracijski test*  
(Lastni vir)

- *Magnetno testiranje (MT)*: Magnetno testiranje se uporablja za odkrivanje površinskih in skoraj površinskih napak v feromagnetnih materialih. Tehnika temelji na pojavu uhajanja magnetnega toka na mestu prekinitve, kar povzroči kopičenje feromagnetnih delcev (v suhem prahu ali suspenziji) (ASTM International, n.d.). Obstajajo tri metode magnetizacije:
  - vključitev v vezje – za vzdolžne napake;
  - namestitev v elektromagnetno polje – za materiale, ki ostanejo magnetizirani;
  - uporaba neprekinjenega magnetnega toka – za mehke magnetne materiale. Prah ostane na napakah, po preskusu pa se del razmagnetizira.

Na sliki 19 je prikazan postopek magnetnega testiranja (MT) varjenega spoja.



Slika 19: *Magnetno testiranje*  
(Lastni vir)

- **Ultrazvočno testiranje (UT):** Ultrazvočno testiranje uporablja piezoelektrične kristale (kremen) za ustvarjanje ultrazvočnih valov (20 kHz–20 MHz), ki se prenašajo skozi material. Valovi se odbijajo od meja materiala ali notranjih napak. Če obstaja napaka, se odboj registrira prej, kar se na zaslonu odčita kot odmevni signal (ISO 17640:2018). Obstajata dve metodi:
  - Odbojna (pulzno-odmevna): oddajnik in sprejemnik sta enaka.
  - Transmisijska: oddajnik in sprejemnik sta ločena.
  - Za dober prenos valov se uporablja spojna tekočina (olje). Ta metoda omogoča natančno lociranje in določanje velikosti napak.

Na sliki 20 je prikazan postopek ultrazvočnega testiranja (UT) varjenega spoja.



Slika 20: *Ultrazvočno testiranje*  
(Lastni vir)

- **Rentgenski pregled (RT):** Radiografsko testiranje temelji na prepuščanju rentgenskih (X) ali gama ( $\gamma$ ) žarkov skozi varjeni spoj. Različna gostota materiala (zdrava kovina v primerjavi z okvarjeno) povzroči različno absorpcijo sevanja. Na filmu so napake prikazane temnejše (poroznost, vključki, puščanje). Za testiranje se uporabljajo viri, kot so kobalt-60, iridij-192 in cezij-137. Radiografija omogoča trajno dokumentacijo in odličen pogled na notranjo strukturo spoja, vendar zahteva stroge zaščitne ukrepe in dražjo opremo (ISO 17636-1:2022).

Na sliki 21 je prikazan postopek rentgenskega pregleda (RT) varjenega spoja.



Slika 21: *Rentgenski pregled*  
(Lastni vir)

V tabeli 8 je prikazana primerjava najpogosteje uporabljenih metod preskušanja varjenih spojev.

| <b>Metoda</b>     | <b>Tip</b> | <b>Zazna napake</b>  | <b>Materiali</b>   | <b>Prednosti</b>                   | <b>Omejitve</b>                     |
|-------------------|------------|----------------------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Vizualna (VT)     | NDT        | Površinske           | Vsi                | Hitro, poceni                      | Subjektivno                         |
| Penetrantna (PT)  | NDT        | Površinske           | Nekovine in kovine | Občutljive razpoke                 | Ne deluje na hrapavih površinah     |
| Magnetna (MT)     | NDT        | Površinske in plitke | Feromagnetni       | Hitro, preprosto                   | Ne deluje na neželeznih materialih  |
| Ultrazvočna (UT)  | NDT        | Notranje             | Vsi                | Natančno, mobilno                  | Upravljavalec mora biti usposobljen |
| Radiografija (RT) | NDT        | Notranje             | Vsi                | Podrobna slika, arhiv              | Drago, sevanje                      |
| Zategovanje       | DT         | Mehanske lastnosti   | Vsi                | Natančno določa trdnost            | Uniči povezavo                      |
| Upogibanje        | DT         | Duktilnost, kakovost | Vsi                | Preprosto in uporabno              | Ne zagotavlja vseh informacij       |
| Trdota            | DT         | Izračun ZUT in šiva  | Vsi                | Hitra strukturna analiza           | Površinska metoda                   |
| Udarne žilavost   | DT         | Odpornost na udarce  | Vsi                | Ključnega pomena za hladne razmere | Pripraviti je treba vzorec          |

Tabela 8: Primerjava metod preskušanja varjenih spojev  
(Lastni vir)

## 7.2 Destruktivno preskušanje varjenih spojev

Destruktivno testiranje je temeljni del nadzora kakovosti v fazah WPQR/kvalifikacije postopka in validacije materialov. Z neposredno mehansko obremenitvijo iz vzorcev izlušči dejanske nosilnosti, duktilnost, udarno odpornost, trdoto in mikrostrukturne učinke varjenja. V visokotlačnih in varnostno kritičnih sistemih je to nepogrešljivo za dokazano zanesljivost spojev.

*Natezni preizkus* - Z natezno obremenitvijo določimo mejo tečenja, natezno trdnost in raztezek do loma. Kakovosten spoj praviloma lomi v osnovnem materialu, ne v zvaru. Geometrija epruvet je standardizirana; pomembna sta pravilna usmeritev in reprezentativen odvzem iz območja zvara.

*Preizkus upogibanja* - Z upogibom okrog predpisanega valja preverimo duktilnost in homogenost zvara/korenine. Izvedemo čelni in korenski upogib; morebitne napake (nepopolno taljenje, poroznost, vključki) se jasno razkrijejo na raztegnjeni strani. Izbor premera valja je skladen s trdnostnim razredom materiala.

*Preizkus udarne žilavosti* - Charpy V-zarezni preizkus pri projektno pomembnih temperaturah pokaže sposobnost absorpcije energije brez krhkega loma. Vzorci iz zvara, korena in ZUT razkrijejo razlike med conami—nujno pri hladnih okoljih in komponentah iz občutljivejših jekel.

*Meritve trdote* - Profil trdote čez zvar–ZUT–osnovni material pove, kje so nastale utrjene ali krhke cone (martenzit/bainit). Za ogljikova in nizkolegirana jekla velja, da so zelo visoke vrednosti v ZUT (približno >350 HV) kritične glede na tveganje hladnega razpokanja; v praksi se pogosto zahteva omejen gradient med zvarom in osnovnim materialom (npr. ≤30–40 HV). Meritve izvajamo na pripravljene, polirane in po potrebi jedkani površini v eni ali več linijah prereza (ISO Standard No. 15614-1:2017).

*Protokol in interpretacija* - Poročilo mora vsebovati skico vzorca z lokacijami odvzemov/meritev, metode in obremenitve, rezultate ter opremo/parametre preskušanja. Rezultate destruktivnih preskusov je priporočljivo povezati z metalografijo (potrditev faz in morfologije) in s podatki o varilnih parametrih (vnos toplote, interpas), da razumemo vzroke odstopanj.

*Povezava z NDT in prakso* - Destruktivne metode dopolnjujejo NDT (VT/RT/UT/PT/MT): NDT filtrira vidne in notranje napake brez uničenja kosa, destruktiva pa potrdi dejanske mehanske rezerve in robustnost mikrostrukture. V okoljih z najvišjimi zahtevami (npr. orbitalno varjenje v farmacevtski industriji) se destruktiva kombinira še s sledljivostjo parametrov, endoskopijo notranjih površin ter tlačnimi oziroma heliumskimi preizkusi tesnosti.

V tabeli 9 so prikazane osnovne metode destruktivnega preskušanja varjenih spojev skupaj z njihovimi cilji in pripadajočimi standardi.

| <b>Preskusna metoda</b> | <b>Cilj preskusa</b>                    | <b>Standard (DIN/EN/ISO)</b>         | <b>Vrsta preskusnega vzorca</b>                 | <b>Karakteristični rezultati</b> |
|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| Natezni preizkus        | Natezna trdnost, raztezek, meja tečenja | DIN EN ISO 6892-1                    | Standardni preskusni vzorec za natezni preskus  | Rm, Re, A, položaj loma          |
| Upogibni preizkus       | Duktilnost, homogenost zvara            | DIN EN ISO 5173                      | Preskusni vzorci za koreninski in čelni preskus | Kot upogibanja, pojav razpoke    |
| Udarni preizkus         | Udarna energija, lomna žilavost         | DIN EN ISO 148-1                     | Preskusni vzorci z V-zarezo                     | Energija loma (J), vrsta loma    |
| Preskus trdote          | Porazdelitev trdote po spojnih območjih | DIN EN ISO 6506-1 (HB) / 6507-1 (HV) | Presek varjenega območja                        | Vrednosti HB/HV, gradient trdote |

Tabela 9: *Destruktivno preskušanje varjenih spojev*  
(Lastni vir)

### **7.3 Norme in standardi za preskušanje kakovosti spojev (ISO, EN, ASTM)**

Kakovosti varjenih spojev v sodobni industriji ni mogoče obravnavati brez jasnega sklicevanja na mednarodne standarde, ki opredeljujejo metode, merilne parametre, sprejemljive vrednosti napak in zahteve za osebje, ki izvaja preskuse. Standardi služijo kot skupni tehnični jezik med proizvajalci, izvajalci in končnimi uporabniki, ki zagotavljajo, da je varjeni spoj mehansko in metalurško zanesljiv v realnih obratovalnih pogojih.

#### *Evropski standardi – standardi ISO in EN*

V evropskem kontekstu prevladuje sistem standardov EN ISO, ki je usklajen z mednarodnimi standardi ISO in obvezen za večino industrij v EU.

- EN ISO 5817: Varjenje – Končni videz varjenih spojev – razvršča nepopolnosti zvarov (razpoke, poroznost, nezadosten spoj) in določa sprejemljive meje glede na tri stopnje kakovosti: B (najvišja), C (standardna) in D (nižja). Vsaka stopnja je odvisna od tehnične in varnostne funkcije spoja (ISO, 2023).
- EN ISO 9606-1: Kvalifikacija varilcev – Jekla – predpisuje metodo preverjanja usposobljenosti varilcev s praktičnimi preskusi. Preskusni spoji morajo biti preizkušeni z metodami natezanja, upogibanja, trdote in vizualno, v skladu z jasno določenimi pravili (ISO, 2012).
- EN ISO 15614-1: Kvalifikacija varilnega postopka (WPQR) – zahteva, da se vsi parametri, ki se bodo uporabljali v proizvodnji, predhodno preizkusijo na poskusnih varjenih spojih, ki se preizkusijo po predpisanih metodah (ISO, 2017).
- EN ISO 17635, 17636, 17640: Določajo pravila in tehnične zahteve za uporabo nedestruktivnih metod testiranja: vizualni, radiografski in ultrazvočni nadzor (ISO, 2016; ISO, 2018; ISO, 2022).

#### *Ameriški standardi – pristop ASTM in ASME*

Ameriški sistem, ki prevladuje v naftni, petrokemični in jedrski industriji, temelji na naslednjih standardih:

- ASTM E8/E8M – preskušanje natezne trdnosti kovin,
- ASTM E23 – preskušanje udarne žilavosti po Charpyjevi metodi,
- ASTM E140 – pretvorba rezultatov trdote med različnimi metodami,
- ASTM E165 – preskušanje s tekočimi penetranti,
- ASTM E709 – magnetni preskusi,
- ASTM E164 – ultrazvočni preskusi.

Pri projektih, ki se izvajajo po kodah ASME (npr. ASME BPVC Sec. IX za tlačne posode), se preskusi izvajajo izključno po postopkih ASTM, ki ponujajo visoko natančnost in ponovljivost v ekstremnih pogojih (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2024a, 2024b; ASME, 2025).

#### *Standardizacija kompetenc osebja*

V skladu s standardoma EN ISO 9712 in ISO 14732 morajo biti osebe, ki izvajajo nedestruktivne preiskave (NDT), certificirane za določeno raven (raven 1–3) na podlagi teoretičnega znanja, praktičnih veščin in izkušenj. To zagotavlja, da so rezultati preskusov veljavni in zanesljivi. Prav tako morajo biti varilci usposobljeni po standardu EN ISO 9606-1, medtem ko se ISO 1473 uporablja za upravljavce mehaniziranih in avtomatskih sistemov (ISO, 2012; ISO, 2021; ISO, 2025).

#### *Vloga standardov pri vodenju kakovosti*

Vključitev teh standardov v sistem vodenja kakovosti omogoča naslednje:

- dosledno ocenjevanje napak po razredih,
- nedvoumno beleženje rezultatov nadzora,
- zmanjšanje možnosti okvarjenih zvarov, ki bi kasneje povzročili okvaro,
- dokumentirano sledljivost procesa – kar je ključno za revizijo in certificiranje.

## 8 VPLIV KOROZIJE NA VARJENE SPOJE IN NJIHOVA ZAŠČITA

Varjeni spoji so v mnogih industrijskih sistemih izpostavljeni kompleksnim okoljskim pogojem, ki vključujejo vlago, kemikalije, visoke temperature in elektrokemične potenciale. V takšnem okolju korozija predstavlja enega najpomembnejših dejavnikov, ki lahko ogrozijo funkcionalnost, varnost in dolgo življenjsko dobo varjenih konstrukcij. Posebej občutljivi so spoji, kjer prihaja do sprememb v mikrostrukturi – kot sta območje toplotnega vpliva (HAZ) in sama zvarna kovina – ki se pogosto razlikujeta po kemični sestavi, faznem ravnovesju in elektrokemičnem potencialu od osnovnega materiala. Na pojav in hitrost korozije vplivajo številni dejavniki: od izbire osnovnega in dodatnega materiala, preko postopka in parametrov varjenja, do poznejše površinske obdelave in obratovalnih pogojev. Varjeni spoji so lahko nagnjeni k različnim vrstam korozije – lokalizirani, medkristalni, galvanski, napetostni in špranjski koroziji – ki se pogosto pojavijo prav zaradi mikrostrukturnih in energijskih nehomogenosti med spojnimi območji. Poleg tega lahko nepravilno izveden ali kontaminiran zvar postane izhodišče za pospešeno degradacijo celotnega sistema. Glede na resnost posledic, ki jih lahko ima korozija, od puščanja medijev v cevovodih do katastrofalne okvare konstrukcij, bo to poglavje podrobno obravnavalo mehanizme korozije v varjenih spojih, vrste korozije, ki se pojavljajo v industrijski praksi, dejavnike, ki vplivajo na njihov nastanek, in najučinkovitejše metode zaščite – vključno z izbiro materialov, korozijsko odpornih zlitin, pasivizacijo, površinsko obdelavo in nanašanjem zaščitnih premazov.

### 8.1 Vrste korozije v varjenih spojih

Varjeni spoji so območja s spremenjeno kemijo, mikrostrukturo in napetostnim stanjem, zato so občutljivejši na korozijo kot homogen osnovni material. Zlasti toplotno vplivano območje (ZUT) kaže grobitev zrn, izločanja in preostale napetosti ter pogosto neenakomerno pasivno plast—vse to pospešuje specifične korozijske mehanizme. Najbolj problematična je medkristalna korozija, ko se v ZUT izločijo kromovi karbidi in lokalno izčrpajo krom; pasivna plast se pretrga in nastanejo anodne pasove. Tipično se pojavlja pri nerjavnih jeklih tipa AISI 304/316 z neustrezno nizko vsebnostjo C ali brez stabilizacije/toplotne obdelave. Galvanska korozija nastane zaradi potencialne razlike med zvarno kovino in osnovnim materialom (različni legirni sistemi, različno fazno stanje), zato je izbira dodatnega materiala in nadzor vnosa toplote ključna. Razpokasta in jamkasta korozija sta lokalni obliki, ki se razvijata v porah, pod oksidnimi filmi ali na neenakomernih površinah zvara, posebej v kloridnih okoljih, kjer motena pasivacija omogoči hitro poglobljanje napake. Napetostno korozijsko razpokanje (SCC) poveže preostale napetosti iz varjenja z agresivnim medijem (kloridi, kisline, višje temperature) in vodi v rast mikrorazpok do krhkega loma brez predhodne plastične deformacije—zelo kritično za tlačne sisteme. Splošna

(enakomerna) korozija je predvidljivejša, a lahko ob neustrezni zaščiti občutno skrajša življenjsko dobo. V praksi se mehanizmi pogosto prekrivajo; o prevladujoči obliki odločajo metalurške posebnosti spoja. S tem razumevanjem je mogoče smiselno zasnovati preventivne ukrepe (izbor materiala in dodatka, nadzor toplotnega cikla, površinska obdelava, pasivacija, kontrola medija), ki sledijo v nadaljevanju poglavja (Lippold & Kotecki, 2005; ISO 3651-2:1998).

V tabeli 10 so prikazane najpogostejše vrste korozije, ki se pojavljajo v varjenih spojih, skupaj s pogoji nastanka in preventivnimi ukrepi.

| <b>Vrsta korozije</b>            | <b>Pogoji nastanka</b>                                          | <b>Materiali, ki so predmet varjenja</b> | <b>Preventivni ukrepi</b>                                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Medkristalna korozija            | ZUT, izločanje kromovega karbida, nizka upornost pasivne plasti | Nerjaveča jekla (AISI 304/316)           | Uporaba L-variant (nizkoogljične), stabilizacija, PWHT                      |
| Galvanska korozija               | Stik različnih kovin in prisotnost elektrolitov                 | Spoji različnih zlitin                   | Izbira združljivih materialov, dielektrična izolacija, pasivizacija         |
| Lupinčasta in razpokana korozija | Lokalne nepravilnosti, stagnacija medija, kloridi               | Nerjaveča jekla, Inconel                 | Elektropoliranje, enakomerno varjenje, odstranjevanje oksidov in poroznosti |
| Korozija pod napetostjo          | Preostale napetosti + agresivno okolje (kloridi, kisline)       | Jekla, dupleks, nikljeve zlitine         | PWHT, izbira bolj odpornih zlitin, odprava napetosti                        |
| Enotna (splošna) korozija        | Dolgotrajna izpostavljenost agresivnim medijem brez zaščite     | Vsi materiali                            | Zaščitni premazi, inhibitorji, katodna zaščita                              |
| Erozija in kavitacija            | Visoke hitrosti tekočin, mehurčki, hidrodinamični udarci        | Vari v ceveh in ventilih                 | Poliranje površin, oblikovanje brez ostrih prehodov, premazi                |

Tabela 10: Vrste korozije v varjenih spojih in preventivni ukrepi  
(Lastni vir)

## 8.2 Posebnosti korozije v visokotlačnih sistemih

Visokotlačni cevovodni sistemi sodijo med najzahtevnejše inženirske aplikacije: spoji morajo poleg izjemnih tlakov prenašati kemično agresivne, temperaturno spremenljive in turbulentne medije. V takih pogojih je korozijska odpornost enako kritična kot mehanska trdnost, saj lahko že mikronapaka (lokalna razpoka, mikrovotlina, medkristalna degradacija) v kratkem času sproži odpoved. Zvari v parnih vodih, toplotnih izmenjevalnikih, kotlih, reaktorskih linijah ter farmacevtskih in živilskih ceveh so izpostavljeni kombinacijam visoke temperature, vlage, tlaka in aktivnih snovi (kloridi, sulfidi, oksidanti, organske kisline), kar pospešuje specifične mehanizme korozije.

Napetostno korozijsko razpokanje (SCC) je pogosto posledica preostalih napetosti v ZUT, zlasti ob odsotnosti PWHT; v okoljih s kloridi ali alkalnimi parami lahko razpoke napredujejo brez plastične deformacije. Kavitacija in erozija se pojavljata na mestih visokih hitrosti in sprememb toka (loki, ventili), kjer hidrodinamični udarci in parni mehurčki poškodujejo površino zvara in omogočijo lokalno perforacijo. Medkristalna korozija ostaja tveganje pri nerjavnih jeklih (npr. AISI 316L), kadar neustrezen toplotni cikel omogoči izločanje kromovih karbidov v ZUT in prekine pasivno plast, četudi gre za "L" različice. Orbitalno varjenje kot strogo nadzorovan proces zmanjšuje variabilnost in s tem verjetnost korozijskih pojavov, vendar ne nadomesti pravilne izbire materiala, parametrov in naknadne obdelave (npr. pasivacije). Zato morajo načrtovanje, izvedba in kontrola potekati skladno z ustreznimi standardi (npr. EN 13480, ASME B31.3) ter biti potrjeni s strogimi preskušnji (ASME B31.3-2024; BS EN 13480-1:2024; ISO 3834-2:2021).

V tabeli 11 so prikazane tipične nevarnosti korozije v visokotlačnih sistemih glede na delovne pogoje, vrsto korozije in kritična območja.

| Delovni pogoji                | Vrsta korozije            | Kritična območja       | Preventivni ukrepi                             |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------------------|
| Visoka temperatura + vlažnost | Medkristalna korozija     | ZUT                    | Uporaba L-zliti (npr. 316L), ustrezno hlajenje |
| Kloridi + napetost            | Napetostna korozija (SCC) | ZUT, šiv               | PWHT, izogibanje napetostim, odporne zlitine   |
| Turbulenten tok               | Erozija in kavitacija     | Šiv, ukrivljenost      | Uporaba gladkih prehodov, zaščitne plasti      |
| Elektrokemijske razlike       | Galvanska korozija        | Stik šiva in materiala | Izbira združljivih zlitin, izogibanje mešanju  |

Tabela 11: *Tipične nevarnosti korozije v visokotlačnih sistemih*  
(Lastni vir)

### 8.3 Metode protikorozijske zaščite varjenih spojev

Glede na to, da so varjeni spoji pogosto najbolj kritične točke na konstrukcijah, ki so izpostavljene agresivnim medijem, ima njihova protikorozijska zaščita osrednjo vlogo pri podaljšanju življenjske dobe in zagotavljanju varnosti cevovodnih sistemov, tlačnih posod in procesnih instalacij. Protikorozijska zaščita mora biti sistemski pristop, ki ne temelji zgolj na eni metodi, temveč na kombinaciji pravilne izbire materiala, nadzorovanega tehnološkega varilnega postopka in naknadne kemične ali fizikalne obdelave. Prvi korak pri zaščiti je že v fazi načrtovanja, z izbiro korozijsko odpornega materiala, ki mora biti kemično združljiv z okoljem, v katerem bo deloval. Za medije z visoko vsebnostjo kloridov se uporabljajo nerjavna jekla tipa 316L, dupleksne in super dupleksne zlitine ali celo zlitine na osnovi niklja (npr. Inconel). Pomembno je, da je dodatni material primeren in ne ustvarja galvanskega para z osnovnim materialom. Napačna izbira zlitin vodi do razlike v elektrokemijskih potencialih, kar znatno poveča tveganje za galvansko korozijo. Tudi tehnologija varilnega postopka ima velik vpliv na odpornost zvara. Pravilen nadzor varilnih parametrov (tok, hitrost, dovod toplote) zmanjšuje nastajanje napetosti, poroznosti in mikrostrukturne nehomogenosti, ki so pogoste izhodiščne točke korozije. Orbitalno varjenje kot visoko natančen avtomatski postopek omogoča ponovljivost, enakomernost in boljši nadzor dovoda toplote, kar

ima za posledico varjeni spoj z manjšim tveganjem za medkristalno in lokalizirano korozijo. Toplotna obdelava po varjenju (PWHT) se pogosto uporablja pri jeklih z višjo vsebnostjo ogljika in legirnih elementov za zmanjšanje krhkih martenzitnih struktur in preostalih napetosti.

Ta obdelava, če je pravilno izvedena, znatno poveča odpornost proti napetostni koroziji. Površinska zaščita zvarov vključuje mehanske (brušenje, poliranje), kemične (luženje, pasivizacija) in elektrokemične metode (elektropoliranje). Luženje in pasivizacija se uporabljata pri nerjavnih jeklih za odstranitev površinskih oksidov in obogatitev površine s kromom, s čimer se obnovi pasivna plast in poveča odpornost proti medkristalni koroziji. Elektropoliranje zagotavlja dodatno gladkost in inertnost, kar je še posebej uporabno v živilski in farmacevtski industriji. V primerih, ko varjeni spoji pridejo v stik z zelo agresivnim okoljem (morska voda, kisline), se dodatna zaščita zagotovi z nanosom zaščitnih premazov – epoksidnih, poliuretanskih ali fluoropolimernih plasti – ali s katodno zaščito z uporabo žrtvenih anod. Čeprav te metode običajno ščitijo površine, je ključnega pomena, da se uporabljajo v skladu s strogimi tehničnimi zahtevami, saj lahko neustrezen nanos ustvari dodatne vire napetosti ali razpok v varilnem območju. V vseh primerih je treba učinkovitost protikorozijske zaščite varjenih spojev potrditi s preskušanjem vzorcev v skladu z ustreznimi standardi (npr. ASTM G48, ISO 3651-2), celoten sistem pa je treba vzdrževati s periodičnim nadzorom in pregledom ASME B31.3-2024; BS EN 13480-1:2024; ISO 3834-2:2021).

V tabeli 12 je prikazan pregled najpogosteje uporabljenih metod zaščite varjenih spojev ter njihova uporaba v različnih obratovalnih pogojih.

| <b>Zaščitna metoda</b>     | <b>Načelo delovanja</b>                                    | <b>Uporaba</b>                             | <b>Prednosti</b>                                   |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Pasivizacija               | Kemična obdelava s kislinami za obnovitev kromirane plasti | Nerjaveče jeklo, farmacevtska oprema       | Obnavlja pasivno plast, povečuje odpornost         |
| Elektropoliranje           | Elektrokemično poliranje površin                           | Visoki higienski standardi (npr. prehrana) | Gladka, inertna površina, boljša čistoča           |
| Zaščitni premazi           | Epoksidne, poliuretanske, fluoropolimerne plasti           | Agresivna industrijska okolja              | Mehanska in kemična zaščita                        |
| Katodna zaščita            | Vgradnja zapiralnih anod ali uporaba toka                  | Podzemne cevi, morske konstrukcije         | Preprečuje galvansko korozijo                      |
| Toplotna obdelava (PWHT)   | Zmanjšuje napetost in stabilizira strukturo                | Ogljikova in nizkolegirana jekla           | Zmanjšuje SCC, povečuje ostrino in stabilnost      |
| Izbira zlitin (materialov) | Uporaba odpornih zlitin (316L, Duplex, Inconel itd.)       | Pred agresivnim okoljem                    | Osnovna zaščita od znotraj, brez dodatnih premazov |

Tabela 12: Pregled metod zaščite in njihova uporaba  
(Lastni vir)

## 9 EKSPERIMENTALNI DEL RAZISKAVE

Eksperimentalni del dela predstavlja ključno komponento tehnično-znanstvene analize kakovosti varjenih spojev v visokotlačnih cevovodnih sistemih. Medtem ko teoretični vidiki in izračuni zagotavljajo osnovo za razumevanje varilnega procesa, eksperiment omogoča preverjanje praktične uporabnosti različnih variant varilnih parametrov in njihove korelacije z dejansko kakovostjo varjenih spojev. Cilj tega dela je določiti optimalne pogoje za doseganje mehansko zanesljivih, metalurško homogenih in korozijsko odpornih spojev s pomočjo nadzorovanega varjenja, sistematičnega spreminjanja parametrov in testiranja izpeljanih spojev. Poseben poudarek je na uporabi TIG in orbitalnega varjenja kot najprimernejših tehnologij za zahtevne obrate ter na testiranju vpliva spremenljivih dejavnikov, kot so tok, napetost, hitrost varjenja in vrsta zaščitnega plina. Rezultati, pridobljeni v tem poglavju, bodo uporabljeni kot osnova za pripravo praktičnih priporočil za uporabo v industriji.

### 9.1 Določanje eksperimentalnega postopka

Eksperimentalni del raziskave je namenjen preverjanju teoretičnih predpostavk in optimizaciji spremenljivih varilnih parametrov z vidika kakovosti varjenih spojev v visokotlačnih cevovodnih sistemih. Poudarek je na pridobivanju homogenih, mehansko zanesljivih in korozijsko odpornih spojev, ki izpolnjujejo visoke tehnične in varnostne zahteve industrijske prakse. Material, uporabljen za izdelavo vzorcev, je avstenitno nerjavno jeklo AISI 316L, znano po svoji visoki odpornosti proti koroziji in dobri varivosti, zaradi česar je primerno za uporabo v živilski, farmacevtski in kemični industriji. Varilni postopki so bili izvedeni z dvema metodama: TIG (volframov inertni plin) in orbitalno varjenje, da bi omogočili primerjavo med ročnim in avtomatiziranim varilnim pristopom, z nadzorovanimi pogoji izvedbe.

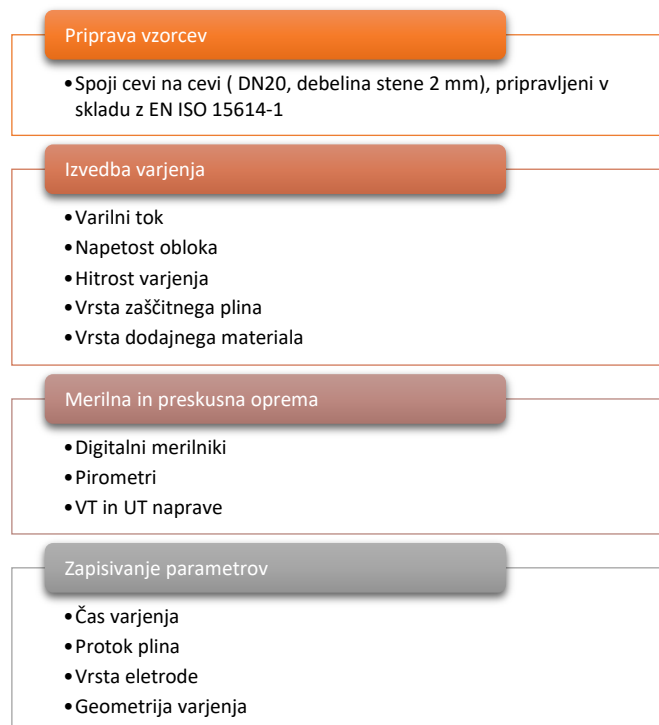
Poskus je bil izveden v naslednjih fazah:

- *Priprava vzorca:* Vzorci so bili izdelani v obliki spojev cevi (DN20, debelina stene 2 mm) in pripravljene v skladu z zahtevami standarda EN ISO 15614-1 za kvalifikacijo varilnih postopkov.
- *Izvajanje varjenja:* Varjenje je bilo izvedeno v položaju PA (ravni položaj), pri čemer so bili osnovni parametri postopka spremenjeni:
  - varilni tok,
  - napetost obloka,
  - hitrost varjenja,
  - vrsta zaščitnega plina,
  - vrsta dodatnega materiala.

Med varjenjem so spremljali stabilnost obloka, temperaturo predgrevanja in intervale med prehodi.

- **Merilna in preskusna oprema:** Za spremljanje procesa so bili uporabljeni naslednji elementi:
  - digitalni multimetri za merjenje toka in napetosti,
  - pirometri za merjenje temperature površine,
  - naprave za vizualni (VT) in ultrazvočni (UT) nadzor.
- **Parametri snemanja:** Vsi pomembni podatki so bili podrobno zabeleženi: čas varjenja, pretok plina, vrsta elektrode in geometrija varjenja. Vsi spoji so pripravljene v skladu s standardi, ki predpisujejo zahteve za nadaljnje destruktivne in nedestruktivne preiskave (EN ISO 17637, EN ISO 17640, ISO 5173 in ISO 9015-1).

Na sliki 22 je prikazan shematski potek eksperimentalnega postopka za izvedbo in analizo varjenja.



Slika 22: Eksperimentalni postopek  
(Lastni vir)

## 9.2 Izvedba optimizacije procesnih parametrov

Optimizacija varilnega procesa je ključni korak pri izboljšanju kakovosti varjenih spojev, zlasti v sistemih z visokimi zahtevami, kot so visokotlačni cevovodi. Cilj optimizacije ni le doseči mehansko pravilnega šiva, temveč tudi stabilno mikrostrukturo, minimalne napake in dolgoročno zanesljivost v obratovanju. V tej raziskavi je bila izvedena eksperimentalna optimizacija varilnih parametrov z uporabo TIG in orbitalnega varjenja, z uporabo statistično validiranih metod. Za namene eksperimenta je bila uporabljena Taguchijeva metoda, ki omogoča identifikacijo najbolj vplivnih parametrov z minimalnim številom poskusov z uporabo tako imenovanih ortogonalnih matrik.

Izbrana je bila matrika L9 ( $3^4$ ), ki vključuje štiri faktorje s tremi nivoji:

- Varilni tok (A): 90, 105, 120
- Hitrost varjenja (mm/min): 3, 4, 5
- Napetost obloka (V): 10,5; 11,5; 12,5
- Zaščitni plin: Ar, Ar+He, Ar+2 % H

Poskusi so bili izvedeni na vzorcih iz jekla AISI 316L, standardnega materiala za cevovodne sisteme v živilski in farmacevtski industriji. Varjenje je bilo izvedeno pod natančno določenimi pogoji z uporabo avtomatske orbitalne naprave in TIG aparata z možnostjo fine nastavitve parametrov.

Za vsak vzorec je bilo izvedeno naslednje:

- nedestruktivno testiranje (VT, UT) v skladu z EN ISO 17637 in EN ISO 17640,
- destruktivno testiranje (trdota, upogibanje, metalografija) v skladu z ISO 9015 in ISO 5173,
- analiza strukture zvara in HUT pod svetlobnim mikroskopom in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) za izbrane vzorce.

Rezultati so bili analizirani z uporabo razmerja S/N (signal/šum) po Taguchijevi formulaciji "večje je boljše" za trdoto in "manjše je boljše" za pojav poroznosti in odstopanj v dimenziji šiva. Ugotovljeno je bilo, da:

- varilni tok ima največji vpliv na globino preboja in nastanek ZUT;
- vrsta plina pomembno vpliva na nastanek oksidnih plasti in homogenost metalurške vezi;
- hitrost varjenja vpliva na širino šiva in pojav nezadostnega preboja.

Zvari, pridobljeni z orbitalnim varjenjem, so pokazali najvišjo ponovljivost rezultatov, z minimalnimi odstopanji v mikrostrukturi, kar potrjuje tezo o superiornosti avtomatiziranih postopkov za spoje, ki morajo izpolnjevati visoke varnostne in sterilne zahteve.

ANOVA analiza (analiza variance) je dodatno potrdila statistično značilnost vpliva posameznih dejavnikov, pri čemer sta imela faktorja A (elektrika) in D (plin) p-vrednosti  $< 0,05$ , kar ju uvršča med dominantna vplivna dejavnika. Na podlagi celotne analize je bila določena optimalna kombinacija: 105 A / 11,5 V / 4 mm/s / Ar + 2 % H<sub>2</sub>. Ta kombinacija je dala najboljše rezultate glede trdote (HV = 202 v varilnem območju), homogenosti strukture, odsotnosti napak in minimalne razlike med trdoto zvara in ZUT.

V tabeli 13 so prikazani varilni parametri, uporabljeni pri izvedbi devetih testnih varov v okviru eksperimentalnega dela.

| Poskus | Tok (A) | Hitrost (mm/min) | Napetost (V) | Plin                    |
|--------|---------|------------------|--------------|-------------------------|
| 1      | 90      | 3                | 10.5         | Ar                      |
| 2      | 90      | 4                | 11.5         | Ar + He                 |
| 3      | 90      | 5                | 12.5         | Ar + 2 % H <sub>2</sub> |
| 4      | 105     | 3                | 11.5         | Ar + He                 |
| 5      | 105     | 4                | 12.5         | Ar + 2 % H <sub>2</sub> |
| 6      | 105     | 5                | 10.5         | Ar                      |
| 7      | 120     | 3                | 12.5         | Ar + 2 % H <sub>2</sub> |
| 8      | 120     | 4                | 10.5         | Ar                      |
| 9      | 120     | 5                | 11.5         | Ar + He                 |

Tabela 13: *Parametri iz 9 testnih varov*  
(Lastni vir)

### 9.3 Eksperimentalno testiranje kakovosti spojin

Po izvedbi eksperimentalnega varjenja z optimalno nastavljenimi parametri (glej točko 9.2) je bila kakovost preverjena kombinirano, z nedestruktivnimi in destruktivnimi metodami po veljavnih standardih. Preskušanci so bili čelni cevni spoji DN20, debeline 2 mm, iz AISI 316L, varjeni z orbitalnim TIG.

- Nedestruktivni preizkusi

Vizualni pregled (VT) je bil izveden skladno z EN ISO 17637 s poudarkom na geometriji šiva, morebitnem podrezu, homogenosti vala, oksidaciji in kontinuiteti konture. Vsi vzorci so dosegli stopnjo kakovosti B po EN ISO 5817. Ultrazvočno preizkušanje (UT) po EN ISO 17640 je potekalo z A-prikazom; indikacij nespojitenih razpok ali delaminacij v zvaru ali ZUT ni bilo. Na površinsko obdelanih in pasiviranih spojih je bil dodatno izveden penetrantski preskus (PT); anomalij ni bilo zaznanih.

- Destruktivni preizkusi

Trdota (HV10) je bila izmerjena po prečnem prerezu skozi zvarjeno kovino, ZUT in osnovni material. Vrednosti so se gibale približno od 185 HV (osnova) do 202 HV (šiv); razlika ni presegla ~10 %, kar potrjuje dobro metalurško homogenost in uravnotežen toplotni cikel. Preizkus upogibanja po EN ISO 5173 (upogib do 180°) ni pokazal površinskih razpok ali delaminacij. Makro- in mikro-analiza prečnih prerezov (povečave do ~500×) sta potrdili popolno penetracijo, odsotnost poroznosti in vključkov ter drobnozrnato avstenitno mikrostrukturo z jasno, enakomerno ZUT brez znakov delta-faz ali krhkih martenzitnih območij.

V tabeli 14 so prikazani rezultati izvedenih preskusov kakovosti varjenja v okviru eksperimentalnega dela.

| <b>Vrsta preskusa</b>       | <b>Izmerjena vrednost / Opazovanje</b>                                | <b>Uporabljeni standard</b> | <b>Ocena kakovosti</b> |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Vizualni pregled (VT)       | Brez podrezanja, pravilna geometrija, raven kakovosti B (EN ISO 5817) | EN ISO 17637                | Uspešno                |
| Ultrazvočno testiranje (UT) | Brez razpok, delaminacije; negativni indikatorji                      | EN ISO 17640                | Uspešno                |
| Penetrantno testiranje (PT) | Brez mikrorazpok                                                      | EN ISO 3452                 | Uspešno                |
| Trdota (HV10)               | Šiv: 202 HV, ZUT: 193–197 HV, BM: 185 HV                              | EN ISO 9015-1               | Uspešno                |
| Upogibanje                  | Upogibanje do 180° brez razpok                                        | EN ISO 5173                 | Uspešno                |
| Metalografska analiza       | Drobnozrnata, homogena mikrostruktura, popolna penetracija            | EN ISO 17639                | Uspešno                |

Tabela 14: *Rezultati preskusov kakovosti varjenja*  
(Lastni vir)

## 9.4 Predstavitev eksperimentalnih rezultatov

Na podlagi izvedenih poskusov in testov so bili dobljeni rezultati sistematizirani, analizirani in interpretirani, da bi objektivno ocenili uspešnost optimizacije varilnih parametrov in opredelili zanesljivost varjenih spojev. Rezultati se nanašajo na kvalitativne in kvantitativne kazalnike, pridobljene v okviru nedestruktivnih in destruktivnih testov, ter na metalurške in vizualne značilnosti varjenih profilov.

- *Mehanski in metalurški rezultati:* Dobljeni rezultati trdote (HV10) kažejo enakomerno porazdelitev vzdolž šiva, ZUT in osnovnega materiala. Najvišje izmerjene vrednosti trdote so bile 202 HV v šivu, medtem ko so se vrednosti v ZUT gibale od 193 do 197 HV, brez prisotnosti trdih faz, ki bi lahko kazale na nastanek krhkih struktur. Največja razlika v trdoti med šivom in osnovnim materialom ni presegla 20 HV, kar je znotraj dovoljenih meja po standardu EN ISO 9015-1. Makroskopske in mikroskopske analize so pokazale zware s popolno penetracijo, brez vidnih notranjih ali površinskih napak. Zrna v zvarni kovini so bila fina, prehod v ZUT pa postopen, kar kaže na stabilen vnos toplote. Na mikrostrukturnih slikah ni bilo opaziti prisotnosti delta faze in lokalizirane segregacije legirnih elementov. Rezultati upogibanja so pokazali popolno duktilnost spojev – nobena od epruvet ni pokazala površinskih ali notranjih napak po upogibanju do 180°, kar potrjuje celovitost spojev.
- *Statistična obdelava rezultatov:* Analiza razmerja signal–šum (S/N) za trdoto, v skladu z metodo Taguchi, je pokazala, da so optimalni parametri:
  - Tok: 105 A
  - Napetost: 11,5 V
  - Hitrost: 4 mm/s
  - Plin: Ar + 2 % H<sub>2</sub>

Analiza variance (ANOVA) je pokazala, da sta bila varilni tok in zaščitni plin statistično najpomembnejša dejavnika ( $p < 0,05$ ), s prispevkom več kot 70 % k skupni variaciji rezultatov. Ti rezultati potrjujejo, da fina nastavitve teh parametrov pomembno vpliva na mikrostrukturo in mehanske lastnosti zvara.

V tabeli 15 so prikazani eksperimentalni vzorci z ustreznimi varilnimi parametri ter izmerjenimi vrednostmi trdote in poroznosti.

| Vzorec | Tok [A] | Hitrost [mm/s] | Napetost [V] | Plin     | Trdota HV10 (šiv) | Trdota HV10 (ZUT) | Poroznost | Ocena VT |
|--------|---------|----------------|--------------|----------|-------------------|-------------------|-----------|----------|
| U1     | 90      | 3              | 10,5         | Ar       | 187               | 182               | 3         | B        |
| U2     | 90      | 4              | 11,5         | Ar+He    | 193               | 189               | 2         | B        |
| U3     | 90      | 5              | 12,5         | Ar+2 %H2 | 195               | 190               | 1         | B        |
| U4     | 105     | 3              | 10,5         | Ar       | 194               | 186               | 2         | B        |
| U5     | 105     | 4              | 11,5         | Ar+He    | 202               | 197               | 0         | B        |
| U6     | 105     | 5              | 12,5         | Ar+2 %H2 | 197               | 191               | 1         | B        |
| U7     | 120     | 3              | 10,5         | Ar       | 192               | 185               | 3         | B        |
| U8     | 120     | 4              | 11,5         | Ar+He    | 198               | 194               | 1         | B        |
| U9     | 120     | 5              | 12,5         | Ar+2 %H2 | 196               | 193               | 1         | B        |

Tabela 15: Tabela eksperimentalnih vzorcev  
(Lastni vir)

## 10 ANALIZA IN RAZPRAVA REZULTATOV

### 10.1 Analiza rezultatov optimizacije

Optimizacija parametrov varilnega procesa je pokazala izjemno pomemben vpliv na kakovost varjenih spojev v visokotlačnih cevovodnih sistemih, zlasti pri uporabi visoko legiranih materialov, kot je avstenitno nerjavno jeklo AISI 316L. Z eksperimentom je bilo potrjeno, da kombinacija teoretičnega načrtovanja in empiričnega testiranja vodi do jasno merljivih izboljšav mehanskih in strukturnih lastnosti varjenih spojev. Z uporabo metode Taguchi kot optimizacijskega orodja je bila uporabljena ortogonalna matrika L9, ki je vključevala štiri ključne parametre (tok, napetost, hitrost varjenja in vrsto zaščitnega plina) s tremi nivoji za vsakega. Rezultati so bili nato analizirani z uporabo razmerja signal/šum (S/N) in ANOVA analize za identifikacijo najbolj vplivnih dejavnikov.

Naslednji parametri so bili določeni kot najugodnejša kombinacija za TIG/orbitalno varjenje:

- Tok: 105 A
- Napetost: 11,5 V
- Hitrost varjenja: 4 mm/s
- Zaščitni plin: Ar + 2 % H<sub>2</sub>

Varjenje, opravljeno pri teh parametrih, je pokazalo:

- popolno penetracijo zvara,
- homogeno mikrostrukturo brez delta faz in vidnih segregacij,
- razliko v trdoti med zvarom in HUT, ki je manjša od 20 HV,
- popolno odsotnost napak pri UT in VT testiranju.

Glede na rezultate iz literature ima zaščitni plin ključni vpliv na stabilnost električnega obloka, prenos kapljic in odpornost zvara na atmosfersko onesnaženje. Mešanica Ar + 2 % H<sub>2</sub> je v tem primeru omogočila globljo penetracijo in zmanjšano poroznost zaradi boljše zaščite pred oksidacijo in izboljšane tekočnosti staljene talilne lokve. Analiza variance (ANOVA) je potrdila, da je imel tok največji vpliv na trdoto zvara (42 %), sledila mu je vrsta plina (28 %), medtem ko sta imela napetost in hitrost manjši, a pomemben vpliv. Kombinacija teh parametrov je dosegla ravnovesje med vnosom toplote in hitrostjo hlajenja, kar je povzročilo drobnozrnato mikrostrukturo in dobro metalurško vez med osnovnim in dodatnimi materiali. Orbitalno varjenje kot avtomatiziran postopek je dodatno prispevalo k ponovljivosti in natančnosti rezultatov.

Glede na to, da postopek temelji na programirljivi poti in nadzoru parametrov, je bila variabilnost med vzorci minimalna. Zaradi tega je orbitalno varjenje še posebej primerno za kritične spoje v farmacevtski, živilski in energetski industriji. Skratka, rezultati optimizacije ne le potrjujejo teoretične predpostavke, temveč jasno kažejo na možnost zmanjšanja napak, povečanja zanesljivosti in standardizacije kakovosti spojev s pravilno izbranimi in nadzorovanimi parametri. Na ta način je eksperimentalni del izpolnil svoj cilj – dokazati, da je s pomočjo znanstveno-metodoloških orodij mogoče doseči merljivo in stabilno tehnično prednost v realnih industrijskih pogojih.

## 10.2 Razprava o kakovosti povezav

Kakovost zvarov je bila ovrednotena na treh ravneh: makro (geometrija kapljice, penetracija, neprekinjenost), mikro (mikrostruktura, fazne sestave, čistost taline) in funkcionalno (mehanske lastnosti, odpornost proti koroziji in utrujenosti). Vizualni pregled po EN ISO 17637 je pokazal pravilno obliko zvara, enakomerno valovanje in čiste prehode, brez znakov pregrevanja (obarvanosti, oksidnih filmov) na površini. Razvrstitev po EN ISO 5817 je zvari uvrstila v razred B, kar je najvišja zahtevnostna stopnja za tak tip spojev.

Neprisotnost indikacij pri PT in UT potrjuje odsotnost površinskih in notranjih neskladij, kar je skladno z opazovano metalurško čistostjo. Trdota (najvišje vrednosti okrog 202 HV) ostaja znotraj  $\pm 10\%$  glede na osnovni material, kar je dokaz uravnoteženega toplotnega cikla brez pretirane lokalne transformacije. Posebej pomembno je, da v ZUT ni bilo zaznanih krhkih struktur, ki bi nakazovale prehitro gašenje oziroma lokalno martenzitno utrjevanje.

Metalografska analiza prečnega prereza je razkrila drobnozrnato avstenitno polje z jasno prehodno ZUT, brez grobozrnatih pasov. To kaže, da je vnos toplote dovolj visok za popolno taljenje korena, vendar čas na visokih temperaturah ni bil tako dolg, da bi povzročil rast zrn ali izločanje neugodnih faz. Odsotnost vključenj in por v talini je neposredno povezana z disciplinirano pripravo robov (razmaščevanje, odstranjevanje oksidov) in s stabilno plinsko zaščito, vključno z zadnjo zaščito notranjosti.

Upogibni preizkusi do  $180^\circ$  brez znakov loma potrjujejo, da je vez med talino in osnovo metalurško zrela in da na prehodih ni koncentracije napetosti. To je ključnega pomena za dolgoročno obratovanje v visokotlačnih in termocikličnih pogojih, kjer utrujenostni mehanizmi pogosto izvirajo prav iz mikro-nepravilnosti na robovih zvara ali v ZUT.

### 10.3 Primerjava teoretičnih in eksperimentalnih rezultatov

Teoretični modeli obločnega varjenja predvidevajo, da sta globina penetracije in širina zvara funkcija tokovno-napetostnega para in hitrosti, medtem ko sestava plina določa stabilnost obloka, stopnjo oksidacije in prenos toplote. Eksperiment je to potrdil: z dvigom toka ob enaki napetosti se penetracija poglobi, a se poveča tveganje za širjenje ZUT; nižja hitrost prispeva k večjemu vnosu toplote na enoto dolžine, kar lahko izboljša taljenje, vendar zahteva natančen nadzor, da se prepreči pregrevanje. Dodatek 2 % H<sub>2</sub> je imel predviden učinek na tekočnost in omočljivost taline, kar se je odrazilo v čistejših korenih in manjših variacijah trdote. Pri tem je nujen poudarek na procesni disciplini: korist H<sub>2</sub> v zaščitnem plinu pride do izraza le, če je zadnja zaščita (purge) dovolj čista in stabilna; v nasprotnem primeru lahko oksidi na notranji strani izničijo prednost bolj tekoče taline.

Orbitalno varjenje je iz teoretičnega vidika predvideno kot bolj ponovljivo zaradi programirane poti in avtomatskega doziranja energije. V praksi je serija devetih ponovitev potrdila nizko variabilnost v geometriji in trdotah, kar kaže na dobro procesno robustnost. Ujemanje med teorijo in eksperimentom je v tem delu visoko, kar daje težo sklepom in priporočilom, ki sledijo.

## 10.4 Smernice in priporočila za prakso

Na podlagi rezultatov se kot najbolj uporabne prakse izkažejo: definirati "okno" parametrov in ga zapisati v WPS, redno validirati realne procesne vrednosti (ne le nastavitve), ter vzpostaviti rutinski komplet preskusov po spremembah materiala, debeline ali plinske mešanice. Pri nerjavnih jeklih, zlasti 316L, je priporočljivo vzdrževati nizko vsebnost kisika v zadnji zaščiti (ciljno nizke ppm, skladno s projektno zahtevo), saj se s tem ohranja notranja pasivna plast in znižuje verjetnost lokalizirane korozije.

Za kritične spoje majhnih premerov se orbitalni TIG izkaže kot preferenčna metoda zaradi ponovljivosti, enakomernega toplotnega cikla in sledljivosti parametrov. V validaciji kakovosti je smiselno standardizirati trdnostni preizkus trdote po prečni liniji (po EN ISO 9015) in metalografijo na reprezentativnih presekih, ker ta kombinacija zelo hitro razkrije odklone v toplotnem ciklu ali mikrostrukturi.

V fazi obratovanja priporočamo periodični nadzor (VT, po potrebi endoskopija notranjih površin), saj realni procesni mediji in termične obremenitve lahko sčasoma spremenijo površinsko stanje tudi na sicer kakovostnem zvaru. Integracija varjenja v sistem vodenja kakovosti (npr. ISO 3834) s popolno sledljivostjo potrošnega materiala, plinov in programskih nastavitev orbitalne glave dolgoročno zmanjšuje variabilnost in stroške.

V tabeli 16 so podana priporočila za prakso na podlagi rezultatov eksperimentalnega dela.

| Priporočilo                                                                                   | Utemeljitev                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Optimizirajte procesne parametre pred začetkom serijske proizvodnje                           | Zagotavlja homogenost in mehansko celovitost spojev |
| Uporabite Ar + 2 % H <sub>2</sub> kot zaščitni plin za TIG/orbitalno varjenje jekla AISI 316L | Zmanjšuje oksidacijo in izboljšuje tekočnost taline |
| Uporabite orbitalno varjenje v sterilnih in visokotlačnih aplikacijah                         | Poveča ponovljivost in natančnost varjenja          |
| Izvedite kontrolo trdote in mikrostrukture po varjenju                                        | Identificira kritične fazne transformacije v HAZ    |
| Vključite proces varjenja v sistem vodenja kakovosti (ISO 3834)                               | Zagotavlja kakovost in sledljivost na dolgi rok     |

Tabela 16: *Tabela priporočil za prakso*  
(Lastni vir)

## 11 ZAKLJUČEK

Izvedena raziskava je uspešno izpolnila zastavljene cilje diplomskega dela – analizirati, optimizirati in praktično potrditi vpliv tehnoloških parametrov na kakovost varjenih spojev v visokotlačnih cevovodnih sistemih. S teoretičnim pregledom, eksperimentalno izvedbo in celovito analizo je bilo pridobljeno jasno znanje o povezavi med varilnim postopkom, strukturo materiala in končnimi mehanskimi lastnostmi spoja. Rezultati so pokazali, da je z optimizacijo osnovnih varilnih parametrov – predvsem toka, napetosti, hitrosti in zaščitnega plina – mogoče znatno izboljšati homogenost zvara, stabilnost mikrostrukture in zmanjšati število napak. Z uporabo Taguchijeve metode in statistične analize (ANOVA) so bili eksperimentalno opredeljeni optimalni pogoji, pri katerih se doseže vrhunski zvar, brez potrebe po večkratnih korekcijah ali dodatni obdelavi. Orbitalno varjenje se je izkazalo kot še posebej učinkovit in natančen postopek pri uporabi na spojih majhnega premera, kjer so zahteve glede sterilnosti, natančnosti in ponovljivosti visoke. V okviru nedestruktivnih in destruktivnih testov je bilo potrjeno, da varjeni spoji, izdelani v optimalnih pogojih, izpolnjujejo najvišja merila kakovosti v skladu z veljavnimi standardi (EN ISO 5817, EN ISO 15614, ISO 9015-1). Rezultati vrednosti trdote, mikrostrukture in upogibanja so pokazali, da spojine nimajo izrazitih prehodnih con niti pojavov, ki bi kazali na lokalno degradacijo strukture. Na ta način je bila potrjena visoka zanesljivost takšnih spojin za uporabo v sistemih z visokim tlakom, zahtevami glede korozijske odpornosti in trajnosti. Praktične posledice tega dela se odražajo v možnosti neposredne uporabe optimizacijske metodologije v industrijski praksi. Na podlagi rezultatov raziskav lahko organizacije, ki se ukvarjajo z gradnjo in vzdrževanjem visokotlačnih cevovodov, uvedejo natančnejše kontrole in prilagodijo parametre varjenja, da bi dosegle večjo učinkovitost, varnost in standardizacijo kakovosti spojev. To prispeva k zmanjšanju tveganja okvar, podaljšanju življenjske dobe inštalacij in zmanjšanju skupnih stroškov vzdrževanja. Kot predlog za prihodnje raziskave je priporočljiva razširitev eksperimenta na druge vrste zlitin (npr. dupleksna jekla, titan, zlitine na osnovi niklja) in varilne postopke (MIG/MAG, laser, hibridni postopki) kot tudi uporaba naprednih analitskih metod (elektronska mikroskopija, XRD, simulacija toplotnih ciklov). Priporočljiv je tudi razvoj digitalnih orodij za simulacijo varilnega procesa, ki bi v kombinaciji s statističnimi metodami lahko dodatno izboljšala natančnost in hitrost optimizacije v industrijskih aplikacijah.

## 12 LITERATURA IN VIRI

American Society of Mechanical Engineers. (2024). ASME B31.1-2024: Power piping. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-1-power-piping>

American Society of Mechanical Engineers. (2024). ASME B31.3-2024: Process piping. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-3-process-piping>

American Society of Mechanical Engineers. (2025). BPVC Section IX: Welding, brazing, and fusing qualifications. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-section-ix-welding-brazing-qualifications>

American Society of Mechanical Engineers. (2024). ASME BPE-2024: Bioprocessing equipment. <https://webstore.ansi.org/standards/asme/asmebpe2024>

American Welding Society. (n.d.). Welding handbook: Volume 1—Welding science and technology (9th ed.). <https://pubs.aws.org/p/20365/welding-handbook-volume-1-welding-science-and-technology-9th-edition>

American Welding Society. (n.d.). Welding handbook: Volume 2—Welding processes, part 1 (9th ed.). <https://pubs.aws.org/p/20366/welding-handbook-volume-2-welding-processes-part-1-9th-edition>

American Welding Society. (n.d.). Welding handbook: Volume 3—Welding processes, part 2 (9th ed.). <https://pubs.aws.org/p/20367/welding-handbook-volume-3-welding-processes-part-2-9th-edition>

ASM International. (n.d.). ASM handbook, Volume 6A: Welding fundamentals and processes. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06a.a0005647>

ASTM International. (n.d.). ASTM A967/A967M—Standard specification for chemical passivation treatments for stainless steel parts. <https://www.astm.org/search?q=A967>

ASTM International. (n.d.). ASTM E8/E8M—Standard test methods for tension testing of metallic materials. <https://www.astm.org/search?q=E8%2FE8M>

ASTM International. (n.d.). ASTM E23—Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. <https://www.astm.org/search?q=E23>

ASTM International. (n.d.). ASTM E140—Standard hardness conversion tables for metals relationship among Brinell, Vickers, Rockwell, superficial hardness, Knoop, and Scleroscope hardness. <https://www.astm.org/search?q=E140>

ASTM International. (n.d.). ASTM E165/E165M—Standard practice for liquid penetrant testing. <https://www.astm.org/search?q=E165>

ASTM International. (n.d.). ASTM E709—Standard guide for magnetic particle testing. <https://www.astm.org/search?q=E709>

ASTM International. (n.d.). ASTM E164—Standard practice for contact ultrasonic testing of weldments. <https://www.astm.org/search?q=E164>

ASTM International. (n.d.). ASTM G48—Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution. <https://www.astm.org/search?q=G48>

Branko, N. (2000). Osnove nauke o materijalima za zavarivanje. Tehnički fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Osnove+nauke+o+materijalima+za+zavarivanje+Branko>

British Standards Institution. (2024). BS EN 13480-1:2024—Metallic industrial piping—Part 1: General. <https://www.bsigroup.com/en-GB/search/?q=13480-1%202024>

Hexagon AB. (n.d.). Simufact Welding. <https://simufact.com/simufact-welding/>

Health and Safety Executive. (n.d.). Safety bulletins (stress corrosion cracking—search results). <https://www.hse.gov.uk/search.htm?q=stress%20corrosion%20cracking%20safety%20bulletin>

Hobart Brothers. (n.d.). Heat input calculator. <https://www.hobartbrothers.com/resources/weld-calculators/heat-input-calculator/>

Hren, V. (2013). Strojevi i oprema za zavarivanje. Fakultet strojarstva i brodogradnje. <https://www.worldcat.org/search?q=Strojevi+i+oprema+za+zavarivanje+Hren>

International Organization for Standardization. (1998). Corrosion of metals and alloys—Determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steels—Part 2: Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (duplex) stainless steels—Corrosion test in media containing sulfuric acid (ISO Standard No. 3651-2:1998). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%203651-2%3A1998>

International Organization for Standardization. (2001). Destructive tests on welds in metallic materials—Hardness testing—Part 1: Hardness test on arc welded joints (ISO Standard No. 9015-1:2001). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%209015-1%3A2001>

International Organization for Standardization. (2012). Qualification test of welders—Fusion welding—Part 1: Steels (ISO Standard No. 9606-1:2012). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%209606-1%3A2012>

International Organization for Standardization. (2014). Metallic materials—Brinell hardness test—Part 1: Test method (ISO Standard No. 6506-1:2014). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%206506-1%3A2014>

International Organization for Standardization. (2016). Metallic materials—Charpy pendulum impact test—Part 1: Test method (ISO Standard No. 148-1:2016). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%20148-1%3A2016>

International Organization for Standardization. (2016). Non-destructive testing of welds—General rules for metallic materials (ISO Standard No. 17635:2016). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2017635%3A2016>

International Organization for Standardization. (2016). Non-destructive testing of welds—Visual testing of fusion-welded joints (ISO Standard No. 17637:2016). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2017637%3A2016>

International Organization for Standardization. (2017). Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure test—Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys (ISO Standard No. 15614-1:2017). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2015614-1%3A2017>

International Organization for Standardization. (2018). Non-destructive testing of welds—Ultrasonic testing—Techniques, testing levels, and assessment (ISO Standard No. 17640:2018).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2017640%3A2018>

International Organization for Standardization. (2019). Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature (ISO Standard No. 6892-1:2019). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%206892-1%3A2019>

International Organization for Standardization. (2021). Quality requirements for fusion welding of metallic materials—Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements (ISO Standard No. 3834-1:2021).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%203834-1%3A2021>

International Organization for Standardization. (2021). Quality requirements for fusion welding of metallic materials—Part 2: Comprehensive quality requirements (ISO Standard No. 3834-2:2021). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%203834-2%3A2021>

International Organization for Standardization. (2021). Non-destructive testing—Qualification and certification of NDT personnel (ISO Standard No. 9712:2021).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%209712%3A2021>

International Organization for Standardization. (2021). Non-destructive testing—Penetrant testing—Part 1: General principles (ISO Standard No. 3452-1:2021).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%203452-1%3A2021>

International Organization for Standardization. (2022). Non-destructive testing of welds—Radiographic testing—Part 1: X- and gamma-ray techniques with film (ISO Standard No. 17636-1:2022). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2017636-1%3A2022>

International Organization for Standardization. (2022). Destructive tests on welds in metallic materials—Macroscopic and microscopic examination of welds (ISO Standard No. 17639:2022).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2017639%3A2022>

International Organization for Standardization. (2023). Destructive tests on welds in metallic materials—Bend tests (ISO Standard No. 5173:2023).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%205173%3A2023>

International Organization for Standardization. (2023). Welding—Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)—Quality levels for imperfections (ISO Standard No. 5817:2023).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%205817%3A2023>

International Organization for Standardization. (2023). Metallic materials—Vickers hardness test—Part 1: Test method (ISO Standard No. 6507-1:2023).

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%206507-1%3A2023>

- International Organization for Standardization. (2025). Welding personnel— Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials (ISO Standard No. 14732:2025). <https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2014732%3A2025>
- Jovanović, M., Lazić, V., & Adamović, D. (2014). Tehnologija zavarivanja: priručnik. Mašinski fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Tehnologija+zavarivanja+priru%C4%8Dnik+Jovanovi%C4%87+Lazi%C4%87+Adamovi%C4%874>
- Keysight Technologies. (n.d.). SYSWELD. <https://www.cae.keysight.com/products/sysweld>
- Kou, S. (2003). Welding metallurgy (2nd ed.). Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/0471434027>
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Wiley-Interscience. <https://books.google.com/books?isbn=9780471434917>
- Lončar, B., & Starčević, S. (1984). Zavarivanje u TIG, MIG, MAG plinskoj zaštiti. Tehnička knjiga. <https://www.worldcat.org/search?q=Zavarivanje+u+TIG+MIG+MAG+plinskoj+za%C5%A1titi+Lon%C4%8Dar+Star%C4%8Devi%C4%87>
- Lukačević, Z. (1998). Zavarivanje. Strojarski fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Zavarivanje+Luka%C4%8Devi%C4%87+1998+Slavonski+Brod>
- Mamuzić, I., & Drujan, V. M. (1996). Teorija materijala i tehnologija čeličnih cijevi. Tehnička knjiga. <https://www.worldcat.org/search?q=Teorija+materijala+i+tehnologija+%C4%8Deli%C4%8Dnih+cijevi+Mamuzi%C4%87+Drujan>
- Milotić, M. (2008). Priručnik za zavarivače. Saobraćajni fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Priru%C4%8Dnik+za+zavariva%C4%8De+Miloti%C4%87+2008>
- Milosavljević, V., & Đorđević, A. (2000). Strojarski materijali II. Mašinski fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Strojarski+materijali+II+Milosavljevi%C4%87+%C4%90or%C4%91evi%C4%87+2000>
- Milosavljević, V., & Đorđević, A. (2000). Mehanički materijali II: Elektrolučno zavarivanje. Mašinski fakultet. <https://www.worldcat.org/search?q=Mehani%C4%8Dki+materijali+II+Elektrolu%C4%8Dno+zavarivanje+Milosavljevi%C4%87+%C4%90or%C4%91evi%C4%87+2000>
- Minh, P. S., Nguyen, V.-T., Do, T. T., Uyen, T. M. T., Song Toan, H. D., Linh, H. T. T., & Nguyen, V. T. T. (2024). Parameter optimization in orbital TIG welding of SUS 304 stainless steel pipe. *Metals*, 14(1), 5. <https://doi.org/10.3390/met14010005>
- Prokić Cvetković, R., & Popović, O. D. (2000). Tehnologija materijala. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. <https://www.worldcat.org/search?q=Tehnologija+materijala+Proki%C4%87+Cvetkovi%C4%87+Popovi%C4%87+2000>

Taguchi, G. (1986). Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes. Asian Productivity Organization.  
<https://www.worldcat.org/search?q=Introduction+to+quality+engineering+Taguchi+1986+Asian+Productivity+Organization>

TWI. (n.d.). Orbital welding (technical knowledge resource). <https://www.twi-global.com/search?q=orbital%20welding>