

# Optimizacija tehnologije robotiziranog MAG zavarivanja strukture kotla

---

Car, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:890923>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Car**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Luka Car

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći i savjetima tijekom studiranja i izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistenticama Andrei Zaninović, mag. ing mech. i dr. sc. Maji Jurici te Krešimiru Sukobljeviću iz Laboratorija za zavarivanje na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada. Također, zahvaljujem se ostalom osoblju Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za materijalografiju te svim nastavnicima koji su mi pomogli tijekom studija.

Zahvaljujem se tvrtkama MCZ i Messer Croatia Plin.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, bratu, sestri, djevojci, bakama i djedovima i ostatku obitelji kao i prijateljima na podršci, strpljenju i razumijevanju tijekom svih faza studiranja.

Luka Car



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA CAR** Mat. br.: 0035205748

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija tehnologije robotiziranog MAG zavarivanja strukture kotla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimisation of robotized MAG welding technology on boiler structure**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati specifičnosti robotiziranog MAG zavarivanja sa stanovišta primjene različitih načina prijenosa metala u električnom luku kao i zahtjeva za pripremom te mogućnost pojave karakterističnih nepravilnosti. Posebno proučiti mogućnosti primjene trokomponentnih plinskih mješavina Ar/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> za zavarivanje nelegiranih čelika. Na zadanoj strukturi kotla analizirati oblikovanje i dimenzioniranje zavarenih spojeva te postojeću tehnologiju.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za zadanu strukturu kotla provesti analizu kritičnih mjesta te pomoću odgovarajućih nerazornih i razornih ispitivanja identificirati moguće rizike. Za odabrane pozicije primjenom žice promjera 1,0mm i trokomponentne mješavine definirati parametre robotiziranog MAG zavarivanja uz podizanje brzine zavarivanja u odnosu na postojeće stanje. Ispitati zavarene uzorke dobivene optimiziranom tehnologijom te dati smjernice za primjenu na stvarnom proizvodu.

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

Zadatak zadan:  
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:  
8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA .....	3
2.1. Oprema za MAG postupak zavarivanja .....	3
2.2. Princip MAG postupka .....	4
2.3. Parametri zavarivanja.....	5
2.3.1. Jakost struje zavarivanja .....	5
2.3.2. Napon struje zavarivanja.....	6
2.3.3. Debljina žice .....	6
2.3.4. Slobodni kraj žice.....	7
2.3.5. Brzina zavarivanja.....	7
2.3.6. Induktivitet .....	7
2.3.7. Zaštitni plin .....	8
2.3.8. Položaj pištolja za zavarivanje .....	11
2.4. Načini prijenosa metala.....	11
2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. Short Circuit Transfer) .....	12
2.4.2. Prijenos metala mješovitim (prijelaznim) lukom (engl. Globular Transfer).....	13
2.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. Spray Transfer).....	14
2.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom (engl. Pulsed transfer) .....	15
2.5. Specifične nepravilnosti kod zavarivanja.....	16
2.5.1. Pukotine .....	16
2.5.2. Naljepljivanje i nedovoljni provar .....	17
2.5.3. Plinski uključci (Poroznosti, šupljine) .....	18
2.5.4. Čvrsti uključci .....	18
2.5.5. Oblik zavara .....	18
2.5.6. Ostale nepravilnosti.....	19
3. ROBOTIZIRANO ZAVARIVANJE.....	20
3.1. Oprema za robotizirano zavarivanje .....	21
3.2. Operativne karakteristike robota za zavarivanje .....	22
3.3. Priprema za robotizirano zavarivanje.....	23
3.4. Programiranje robota.....	24

---

3.5.	Prednosti robotiziranog zavarivanja.....	25
3.6.	Nedostatci robotiziranog zavarivanja.....	25
4.	NDT ( <i>engl. Non destructive testing</i> ).....	26
4.1.	NDT metode.....	28
4.1.1.	Vizualna metoda (VT) .....	30
4.1.2.	Metoda ispitivanja penetrantima (PT).....	32
4.2.	Kriterij prihvatljivosti.....	35
5.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	37
5.1.	Definiranje i nomenklatura kritičnih pozicije .....	40
5.2.	Vizualni pregled (VT).....	42
5.3.	Ispitivanje penetrantom (PT).....	46
5.4.	Izrada i analiza makroizbrusaka.....	49
5.5.	Analiza problema postojeće tehnologije zavarivanja.....	54
5.6.	Optimizacija tehnologije zavarivanja.....	56
5.6.1.	Promjena brzine zavarivanja .....	56
5.6.2.	Promjena debljine žice .....	56
5.6.3.	Promjena načina prijenosa metala.....	57
5.6.4.	Promjena zaštitnog plina .....	57
5.6.5.	Promjena rasporeda vođenja zavara.....	58
5.7.	Zavarivanje probnih uzoraka.....	59
5.8.	Analiza makroizbrusaka probnih uzoraka.....	63
5.9.	Usporedba postojeće i optimizirane tehnologije zavarivanja.....	66
6.	ZAKLJUČAK.....	67
7.	LITERATURA .....	69
	PRILOG 1 .....	71

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Oprema za MAG zavarivanje [4] .....	4
<b>Slika 2.</b> Utjecaj jakosti struje na izgled zavara .....	6
<b>Slika 3.</b> Utjecaj napona na izgled zavara [4].....	6
<b>Slika 4.</b> Utjecaj debljine žice na izgled zavara [4].....	6
<b>Slika 5.</b> Utjecaj brzine zavarivanja na izgled zavara [4].....	7
<b>Slika 6.</b> Zavari dobiveni korištenjem dvokomponentnog i jednokomponentnog zaštitnog plina [9].....	10
<b>Slika 7.</b> Utjecaj položaja pištolja na izgled zavara [4].....	11
<b>Slika 8.</b> Shematski prikaz ovisnosti načina prijenosa metala o struji i naponu [4].....	12
<b>Slika 9.</b> Prijenos metala kratkim spojevima [2] .....	13
<b>Slika 10.</b> Prijenos metala mješovitim (prijelaznim) lukom [2].....	14
<b>Slika 11.</b> Prijenos metala štrcajućim lukom [2] .....	14
<b>Slika 12.</b> Prijenos metala impulsnim lukom [2] .....	15
<b>Slika 13.</b> Topla pukotina [4] .....	17
<b>Slika 14.</b> Nepravilnost oblika zavara - ugorina [15].....	19
<b>Slika 15.</b> Robotska stanica za MAG zavarivanje [4] .....	21
<b>Slika 16.</b> Jednoosni pozicioner [15].....	22
<b>Slika 17.</b> Tehnički zahtjevi kod vizualne metode [17] .....	30
<b>Slika 18.</b> Ispitivanje penetrantom crvenog pigmenta [21] .....	33
<b>Slika 19.</b> Ispitivanje fluorescentnim penetrantom [22].....	34
<b>Slika 20.</b> Dijagram toka Indikacija – Nepravilnost – Greška [18].....	36
<b>Slika 21.</b> Stražnja i prednja strana kotla.....	38
<b>Slika 22.</b> Pozicija 1a prije zavarivanja [24] .....	39
<b>Slika 23.</b> Kritične pozicije propuštanja kotla I [24].....	40
<b>Slika 24.</b> Kritične pozicije propuštanja kotla II [24].....	41
<b>Slika 25.</b> Razrezivanje kotla na veće dijelove zbog provođenja ispitivanja penetrantom .....	46
<b>Slika 26.</b> Propuštanje Pozicije 2 .....	47
<b>Slika 27.</b> Propuštanje Pozicije 3 .....	48
<b>Slika 28.</b> Propuštanje Pozicije 4 .....	48
<b>Slika 29.</b> Uređaj za ručno poliranje <i>Presi Minitech 233</i> .....	49



<b>Slika 30.</b> Raspored vođenja zavara (postojeća tehnologija zavarivanja) [24] .....	55
<b>Slika 31.</b> Primjer ispravnog rasporeda vođenja zavara na postojećem primjeru [24] .....	58
<b>Slika 32.</b> Primjer mjesta započinjanja i završavanja zavara .....	58
<b>Slika 33.</b> Ispitivanje probnog uzorka A penetrantom .....	62

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1.</b> Podjela metoda i tehnika NDT-a [18] .....	28
<b>Tablica 2.</b> Pregled NDT metoda i njihovih prednosti i ograničenja.....	29
<b>Tablica 3.</b> Informacije o radnom mediju .....	38
<b>Tablica 4.</b> Svojstva čeličnog lima DD12 [Prilog 1] .....	39
<b>Tablica 5.</b> VT pregled kritičnih pozicija.....	42
<b>Tablica 6.</b> Rezultati ispitivanja propuštanja penetrantom .....	47
<b>Tablica 7.</b> Analiza makroizbrusaka .....	50
<b>Tablica 8.</b> Mehanička svojstva korištene žice .....	57
<b>Tablica 9.</b> Probni uzorci zavareni optimiziranom tehnologijom .....	59
<b>Tablica 10.</b> Analiza makroizbrusaka probnih uzoraka .....	63
<b>Tablica 11.</b> Usporedba parametara zavarivanja postojeće i optimizirane tehnologije .....	66

**POPIS OZNAKA I KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
a	mm	Visina zavara
AC	-	Akustička metoda nerazornih ispitivanja
ET	-	Nerazorna metoda ispitivanja korištenjem vrtložnih sruja
GPR	-	Radarska metoda nerazornih ispitivanja
IR	-	Termografska metoda nerazornih ispitivanja
LT	-	Vakuumska metoda nerazornih ispitivanja
MAG	-	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu aktivnog plina
MIG	-	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu inertnog plina
MT	-	Magnetska metoda nerazornih ispitivanja
NDT	-	Nerazorna ispitivanja
PT	-	Penetrantska metoda nerazornih ispitivanja
RT	-	Radiografska metoda nerazornih ispitivanja
UT	-	Ultrazvučna metoda nerazornih ispitivanja
VT	-	Vizualna metoda nerazornih ispitivanja
WPS	-	Specifikacija postupka zavarivanja ( <i>engl. Welding Procedure Specification</i> )

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisana je optimizacija trenutno korištene tehnologije robotiziranog zavarivanja strukture kotla s problemom propuštanja. Ustanovljeno je da do propuštanja zavarenih spojeva dolazi zbog naljepljivanja. Promijenjeni su parametri zavarivanja poput debljine žice, brzine zavarivanja, zaštitnog plina i načina prijenosa metala te su zavareni probni uzorci, koji su potom podvrgnuti analizi. Zaključeno je da se zbog korištenja tanje žice i trokomponentne plinske mješavine postiže bolja penetracija. Pri tome su eliminirani greška propuštanja i naljepljivanje uz veću brzinu zavarivanja. Također su, u prvom dijelu rada, teoretski objašnjeni MAG postupak zavarivanja, korišteni NDT postupci, kao i područje robotiziranog zavarivanja.

Ključne riječi: robotizirano zavarivanje, tehnologija zavarivanja, optimizacija, MAG, NDT

## **SUMMARY**

In this thesis the optimisation of currently used technology of robotically welded boiler structure with leakage problem is described. It was established that the cause of leakage of welded joints is lack of fusion. Welding parameters such as wire thickness, welding speed, shielding gas and metal transfer mode were changed and test specimens were welded and then subjected to analysis. It has been found that better penetration is achieved due to the use of a thinner wire and a three-component gas mixture. Leaking has been eliminated as well as lack of fusion while the welding speed has been increased. In the first part of the thesis, the MAG welding process is theoretically explained, as well as used NDT methods and the domain of robotic welding.

Key words: robotic welding, welding technology, optimisation, MAG, NDT

## 1. UVOD

Zavarivanje je izrazito složeno područje s mnogo izazova i mogućnosti. Razne tehnologije omogućuju široku paletu različitih rješenja određenog problema u procesu proizvodnje nekog proizvoda. Integracija područja zavarivanja s područjem robotike donosi razne prednosti u odnosu na konvencionalne ručne postupke zavarivanja, međutim pritom se pojavljuju novi, drugačiji i često puta još zahtjevniji problemi i izazovi u oba područja, a na čijem rješavanju svakodnevno rade brojni inženjeri. U ovom radu prikazan je način rješavanja jednog takvog problema. Nakon robotiziranog zavarivanja strukture kotla dolazi do propuštanja zavarenih spojeva. U eksperimentalnom dijelu ovog rada analizirao se uzrok pojave propuštanja te je predložen niz izmjena postojeće tehnologije kojima se nastojala smanjiti vjerojatnost pojave propuštanja i uz to povećati produktivnost proizvodnje i kvaliteta proizvoda. Korištenjem optimizirane tehnologije je eliminiran problem propuštanja i povećana brzina zavarivanja.

U drugom poglavlju diplomskog rada opisan je i objašnjen postupak zavarivanja MAG (*engl. Metal Active Gas*), najčešće korištena oprema za MAG zavarivanja te parametri zavarivanja s posebnim naglaskom na zaštitni plin. Također, navedeni su i opisani načini prijenosa metala, kao i specifične nepravilnosti koje se pojavljuju kod MAG zavarivanja.

U trećem poglavlju obrađeno je područje robotiziranog zavarivanja u kontekstu najčešće korištene opreme za robotizirano zavarivanje, karakteristika robota za zavarivanje, potrebnih priprema na proizvodu koje prethode zavarivanju, načina programiranja robota te specifičnih prednosti i nedostataka kod integracije robota i zavarivanja.

U četvrtom poglavlju opisane su najčešće korištene metode NDT (*engl. Non destructive testing*) s posebnim naglaskom na vizualnu metodu i metodu ispitivanja penetrantima koje su korištene u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Također je objašnjen odnos između indikacije, nepravilnosti i greške u zavarenom spoju, kao i kriterij prihvatljivosti.

U petom poglavlju opisan je eksperimentalni dio rada u kojem se pristupilo analizi kotla dobivenog od proizvođača s problemom propuštanja na zavarenim spojevima. Nakon obavljenih NDT ispitivanja (vizualnog pregleda i pregleda penetrantima) izrađeni su makroizbrusci zavarenih spojeva koji su analizirani, kao i postojeća tehnologija izrade kotla. Uočene su nepravilnosti iz kojih se zaključilo o uzročno-posljedičnoj vezi postojeće tehnologije i propuštanja. Postojeći parametri zavarivanja su promijenjeni, odnosno prilagođeni kako bi se u konačnici dobila optimizirana tehnologija kojom bi se spriječio nastanak propuštanja i povećala produktivnost proizvodnje. Potom je tom optimiziranom tehnologijom zavaren niz probnih uzoraka. Najbolji od njih su dodatno ispitani i analizirani, a izrađeni makroizbrusci su uspoređeni s onima uzetima iz dobivenog kotla. Konačno je postojeća (trenutno korištena) tehnologija zavarivanja uspoređena s optimiziranom te su dane smjernice proizvođaču na koji način dodatno povećati kvalitetu zavarenih spojeva.

U šestom poglavlju prezentirani su zaključci nastali temeljem teorijskog i eksperimentalnog dijela rada, odnosno obradom i analizom literature, konzultacijama s mentorom prof. dr. sc. Ivicom Garašićem, kao i korištenjem znanja stečenog tijekom studija.

## 2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Postupak zavarivanja MAG (*engl. Metal Active Gas*, oznaka 135 prema normi HRN EN ISO 4063) je jedan od postupaka zavarivanja koji koristi toplinu generiranu električnim lukom kako bi rastalio osnovni i dodatni materijal. Elektrolučni postupci se često upotrebljavaju zbog mogućnosti kontroliranja i usmjeravanja topline generirane električnim lukom [1]. Cijeli postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Za zaštitni plin se koriste plinske mješavine koje se sastoje od aktivnih plinova ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) i kisika (O<sub>2</sub>), a koje mogu i ne moraju sadržavati inertan plin argon (Ar). Ovisno o prisutnosti i volumnom udjelu pojedine komponente razlikujemo različite plinske mješavine.

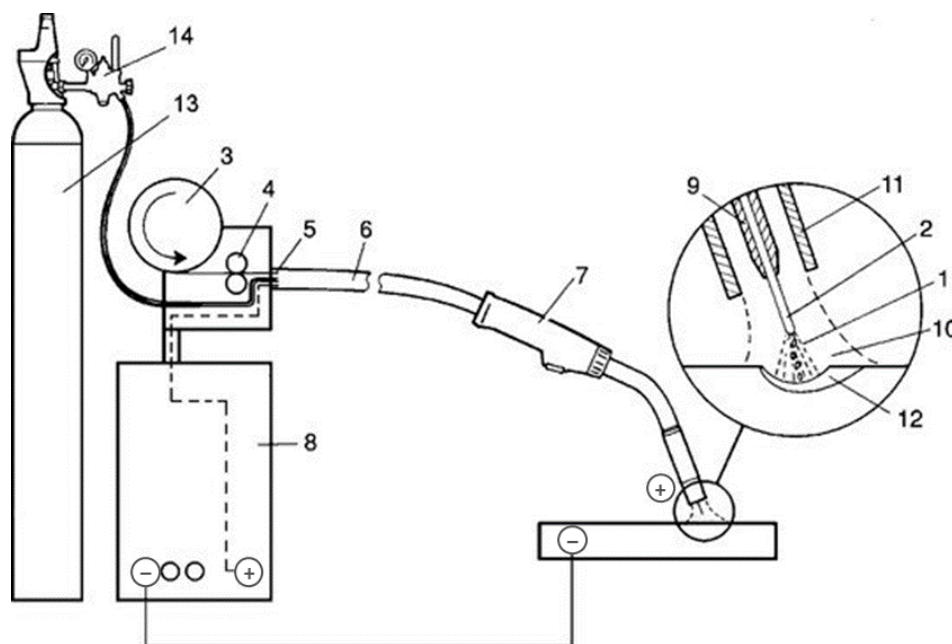
MAG postupak zavarivanja je uz MIG (*engl. Metal Inert Gas*, oznaka 131 prema normi HRN EN ISO 4063) postupak jedan od najčešće korištenih postupaka zavarivanja u današnje vrijeme. Razlog tome je veća produktivnost u odnosu na druge ručne postupke, uz to postupak se može relativno jednostavno automatizirati i robotizirati, čime se omogućava povećanje kvalitete i efikasnosti proizvodnje te se povećavaju varijabilnost i agilnost. MAG postupkom je moguće zavarivanje debelostijenih i tankostijenih materijala, navarivanje i reparaturno zavarivanje materijala, a postupak se najčešće primjenjuje za nelegirane i niskolegirane čelike. Postupak MAG zavarivanja se označava oznakom 135, u skladu s normom HRN EN ISO 4063:2012. [2]

### 2.1. Oprema za MAG postupak zavarivanja

Oprema za MAG postupak zavarivanja sastoji se od sljedeće opreme **Slika 1**[2][3]:

- izvora struje
- boce sa zaštitnim plinom
- regulatora protoka plina
- dodavača žice
- polikabela
- pištolja za zavarivanje
- uređaja za vodeno hlađenje (opcionarno)
- priključka mase.





**Slika 1.** Oprema za MAG zavarivanje [4]

## 2.2. Princip MAG postupka

Postupak MAG zavarivanja započinje zatvaranjem strujnog kruga uspostavljanjem električnog luka (Slika 1 – oznaka (1)) između taljive elektrode – žice (2) i radnog komada. Električni luk je snažno usmjereno gibanje elektrona u ioniziranom plinu. Žica se nalazi namotana u kolutu (3). Sustav za dodavanje žice osigurava konstantnu dobavu žice u električni luk prilikom zavarivanja. Mehanizam dodavača (4) gura žicu kroz fleksibilan vod (5) i polikabel (6) do pištolja za zavarivanje (7). Kontaktna cjevčica (9) prenosi potrebnu električnu energiju na žicu. Žica kod MAG postupka zavarivanja ima ulogu elektrode i dodatnog materijala i najčešće se spaja na pozitivan pol električnog izvora struje (8) dok se radni komad (osnovni materijal) spaja na negativni pol priključkom mase. Zaštitnom plinu iz boce (13) se plinskim regulatorom (14) smanjuje tlak i po potrebi regulira protok. Potom zaštitni plin pod tlakom polikabelom dolazi do pištolja za zavarivanje. Sapnica (11) provodi i usmjerava zaštitni plin (10) na područje taline (12). Uređaji za zavarivanje konstruirani za rad s visokim strujama (preko 250-300 A) imaju sustav vodenog hlađenja koji preko polikabela hladi pištolj i time ga štiti od pregrijavanja. Polikabelom, uz ranije navedeno prolaze i komunikacijski i upravljački kabeli. [4]

Prednost MAG postupka je u tome što se grije samo manji dio žice<sup>1</sup> od kontaktne cjevčice do vrha žice. Debljine žica koje se koriste za MAG postupak se kreću u rasponu od 0,6 mm do 2,4 mm. Najčešće se nastoji koristiti žica koja je svojim svojstvima što sličnija osnovnom materijalu kako bi se dobila homogenost materijala zavara. Žice su zbog električnih svojstava i korozijske zaštite najčešće pobakrene ili poniklane, a važno je da površina žice bude glatka i dimenzije točne. Osim punih žica postoje i praškom punjene žice koje se ili koriste uz plinsku zaštitu ili same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu izgaranjem jezgre. [2][3]

### **2.3. Parametri zavarivanja**

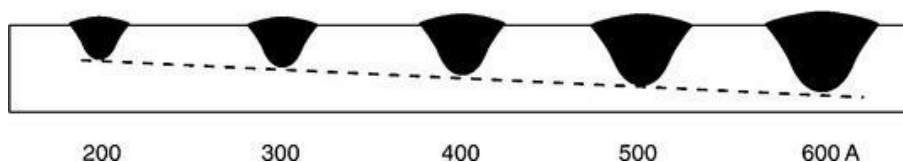
Parametri zavarivanja su čimbenici na koje se može utjecati i koje je moguće mijenjati s ciljem dobivanja zavara željenih svojstva. Kombinacijom parametara dobiva se zavar određenih svojstva i kvalitete. Promjenom parametara moguće je korigirati i čimbenike na koje nemamo direktan utjecaj. Ako parametri nisu definirani u Specifikaciji postupka zavarivanja (WPS-u) odabiru se okvirnim redoslijedom na temelju iskustva, a nakon zavarivanja probnog uzorka korigiraju i iteriraju dok se ne dobije optimalna kombinacija istih. Izbor parametara je u direktnoj korelaciji s vrstom i debljinom osnovnog materijala, odabranim dodatnim materijalom (žicom) i zahtijevanom kvalitetom zavarenog spoja. [2]

#### **2.3.1. Jakost struje zavarivanja**

Jakost električne struje zavarivanja je usko povezana s penetracijom i količinom depozita dodatnog materijala. Povećanjem jakosti struje povećavaju se penetracija i količina depozita materijala (Slika 2). Parametar jakosti struje zavarivanja se određuje prema vrsti i debljini osnovnog materijala, položaju i brzini zavarivanja i promjeru žice. S obzirom na to da način prijenosa metala ovisi o jakosti struje i naponu, ovim parametrom je moguće mijenjati način prijenosa metala. [2][4]

---

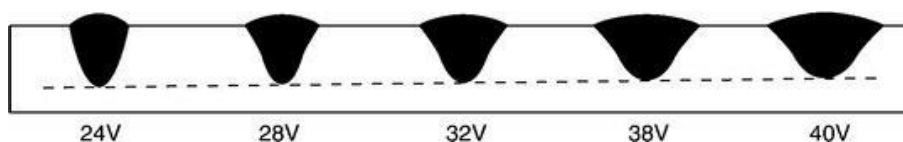
<sup>1</sup> Ako se zanemari zagrijavanje ostatka žice zbog kondukcije. „Kondukcija označava način prijenosa topline s tijela na tijelo ili unutar samoga tijela pri kojemu tvar miruje, a toplina se prenosi tako da molekule tijela koje se gibaju brže i imaju veću kinetičku energiju predaju tu energiju sporijim molekulama.“ [5]



**Slika 2.** Utjecaj jakosti struje na izgled zavara

### 2.3.2. Napon struje zavarivanja

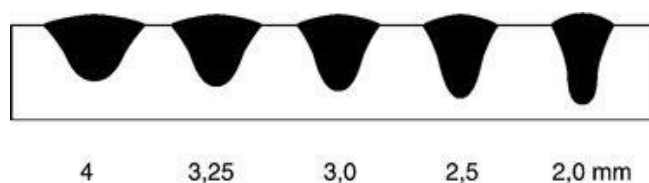
Povećanjem napona struje zavarivanja povećava se duljina električnog luka te se dobiva bolje razlijevanje taline uz smanjenu penetraciju u osnovni materijal. Napon utječe na stabilnost električnog luka i širinu i dubinu dobivenog zavara (Slika 3). [2][4]



**Slika 3.** Utjecaj napona na izgled zavara [4]

### 2.3.3. Promjer dodatnog materijala/žice

Promjer dodatnog materijala (debljina žice) se bira ovisno o korištenoj jakosti struje zavarivanja i debljini osnovnog materijala. U pravilu se korištenjem tanje žice dobiva stabilniji proces s većom penetracijom (za istu struju), dok se korištenjem deblje žice dobiva manja penetracija, ali veći depozit materijala i veća ekonomičnost postupka (Slika 4). [4]



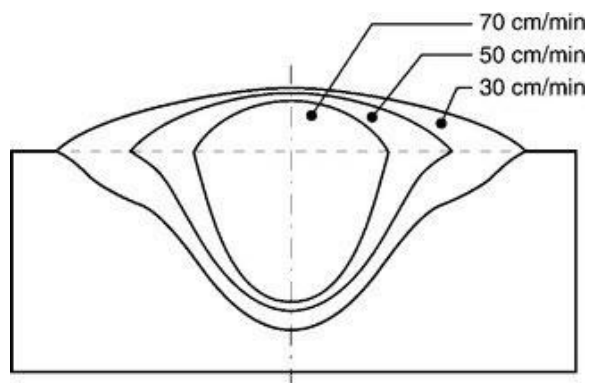
**Slika 4.** Utjecaj debljine žice na izgled zavara [4]

### 2.3.4. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice je udaljenost između kontaktne vodilice i vrha žice (početka električnog luka). Povećanjem slobodnog kraja žice dolazi do smanjenja jakosti struje i unesene topline dok količina depozita ostaje ista. S obzirom na to, povećanjem slobodnog kraja žice dolazi do smanjene penetracije i povećane opasnosti od naljepljivanja dodatnog materijala. [4]

### 2.3.5. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja se definira kao relativna brzina između električnog luka i radnog komada [2]. Brzina zavarivanja ima utjecaj na penetraciju i širinu zavora. Povećanjem brzine zavarivanja dobiva se uži zavar manje penetracije, dok se smanjenjem brzine dobiva šire razlijevanje taline, odnosno zavar veće širine i penetracije (Slika 5). [4]



**Slika 5.** Utjecaj brzine zavarivanja na izgled zavora [4]

### 2.3.6. Induktivitet

Induktivitet je parametar koji definira vrijeme potrebno da bi došlo do povećanja jakosti struje do svoje vršne vrijednosti. Smanjenjem induktiviteta se smanjuje vrijeme potrebno da struja dosegne svoje vršnu vrijednost, čime se utječe na brzinu formiranja kapljice tijekom zavarivanja načinom prijenosa materijala kratkim spojevima ili prijelaznim lukom. Zavarivanje s niskim induktivitetom se očituje dobivanjem veće količine manjih kapljica, odnosno dobivanjem viskozne, guste taline koja se ne razlijeva i primjenjiva je za prisilne položaje

zavarivanja (poput nadglavnog). Povećanjem induktiviteta dobivaju se veće i toplije kapljice pogodne za horizontalne položaje zavarivanja. [6]

### 2.3.7. *Zaštitni plin*

Zaštitni plinovi imaju bitan utjecaj na učinkovitost MAG zavarivanja. Osim osnovne uloge zaštite taline i rastaljenog dodatnog materijala od kontaminacije, oni doprinose uspostavljanju i održavanju stabilnosti električnog luka, utječu na geometriju zavara, metalurške procese u talini, kao i na mehanička svojstva zavara. Zajedno s drugim parametrima zavarivanja uvjetuju način prijenosa metala. Izbor zaštitnog plina i protoka istog utječe na cjelokupni proces zavarivanja i konačnu kvalitetu izvedenog zavara. [3][7]

Zaštitne plinske mješavine utječu na penetraciju, širinu zavara, brzinu zavarivanja, količinu rastaljenog metala, potrebu predgrijavanja radnog komada, izgled, čvrstoću, žilavost i korozijsku postojanost zavara. Prilikom zavarivanja, u području električnog luka, zaštitni plin prelazi u ionizirano stanje plazme pri čemu postaje električni vodič. [3][7]

Fizikalna svojstva plinova koja su važna za razumijevanje djelovanja zaštitnih plinova su [7]:

- ionizacijski potencijal<sup>2</sup>
- toplinska vodljivost
- disocijacija i rekombinacija
- kemijska reaktivnost
- gustoća
- čistoća.

Zaštitni plinovi za zavarivanje mogu biti jednokomponentni (čisti) plinovi ili plinske mješavine sastavljene od više komponenta. Plinovi koji se koriste kod MAG zavarivanja su ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) te dvokomponentne i trokomponentne mješavine ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), argona (Ar) i helija (He). Moguća je pojava vodika (H<sub>2</sub>) i dušika (N<sub>2</sub>) u manjim udjelima.

---

<sup>2</sup> Ionizacijski potencijal je energija potrebna da se atomu ukloni jedan elektron. [7]

Usporedba izgleda dobivenog zavara zavarivanjem s jednokomponentnom i dvokomponentnom plinskom zaštitom prikazana je na Slika 6. [8]

Plinske mješavine se, u pravilu, proizvode u više varijanti koje se razlikuju ovisno o volumnim udjelima pojedinih komponenti. Primjena pojedine varijante plinske mješavine ovisi o specifičnoj situaciji.

#### 2.3.7.1. *Jednokomponentni plin*

Kod MAG postupka zavarivanja se kao jednokomponentni zaštitni plin jedino koristi ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ). Zavarivanjem u zaštiti ugljikovog dioksida plinom smanjuje vjerojatnost pojave naljepljivanja. Nedostaci uporabe ovog plina su veće rasprskavanje i nemogućnost korištenja pri prijenosu metala štrcajućim lukom. [4][8]

#### 2.3.7.2. *Dvokomponentne plinske mješavine*

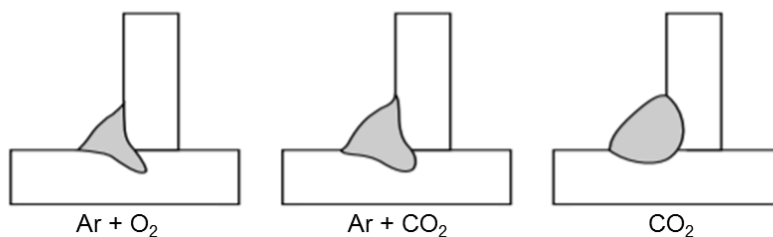
Dvokomponentne plinske mješavine se najčešće primjenjuju kod MAG postupka zavarivanja. Uobičajene mješavine su [8]:

- Argon (Ar) + ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ )

Plinska mješavina argona i ugljikovog dioksida podržava sve četiri metode prijenosa metala (opširnije opisane u poglavlju 2.4.). Ugljikov dioksid doprinosi povećanju širine zavara dok se njegovim disociranjem doprinosi stabilizaciji električnog luka.

- Argon (Ar) + kisik ( $\text{O}_2$ )

Plinska mješavina argona i kisika poboljšava svojstva električnog luka te je povećana viskoznost taline, što doprinosi zavarivanju u prisilnim položajima. Kisik povećava stabilnost električnog luka, unos topline i brzinu zavarivanja. Dodatno kisik doprinosi stvaranju manjih kapljica prilikom prijenosa metala štrcajućim lukom.



**Slika 6.** Zavari dobiveni korištenjem dvokomponentnog i jednokomponentnog zaštitnog plina [9]

### 2.3.7.3. Trokomponentne plinske mješavine

Trokomponentne plinske mješavine se koriste pri zavarivanju ugljičnih (nelegiranih) i nehrđajućih čelika te pri zavarivanju legura nikla. Uobičajeno korištene mješavine su [9][10]:

- Argon (Ar) + helij (He) + ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ )

Plinska mješavina argona, helija i ugljikovog dioksida je uobičajena za zavarivanje nehrđajućih čelika, a mješavine s manjim udjelom helija koriste se za zavarivanje niskolegiranih čelika. Prednosti korištenja ovih plinskih mješavina su smanjenje prskanja, povećanje viskoznosti taline te dobivanje stabilnijeg električnog luka. Povećanim udjelom helija visoke toplinske vodljivost doprinosi se položenijem izgledu zavara i boljem miješanju osnovnog i dodatnog materijala. Manjim udjelom helija, a većim argona povećava se širina zavara i smanjuje vjerojatnost pojave naljepljivanja. Ovom plinskom mješavinom se može, ovisno o omjeru pojedinih komponenti, zavarivati svim načinima prijenosa metala (osim mješovitim lukom).

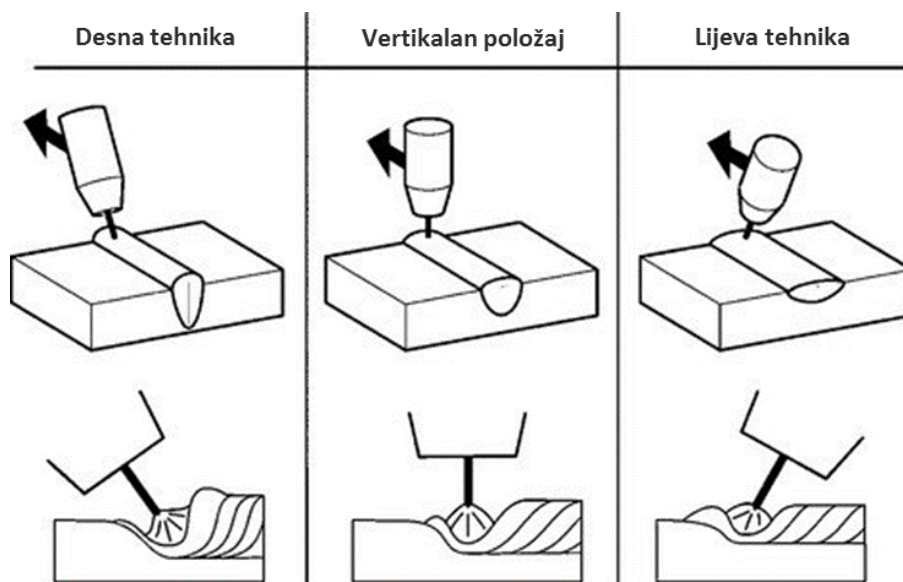
- Argon (Ar) + ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) + kisik ( $\text{O}_2$ )

Plinska mješavina argona, ugljikovog dioksida i kisika se koristi za zavarivanje ugljičnih čelika raznih debljina.. Koristi se kada se zahtijevaju dobra mehanička svojstva zavarenog spoja. Povećani udio inertne komponente (argona) smanjuje rasprskavanje dok kod tankih materijala kisik u mješavini plinova poboljšava stabilnost električnog luka i smanjuje potrebnu jakost struje za 30 do 60 A. U skladu s tim se smanjuje unos topline te posljedično deformacije i opasnost od prekomjernog

zagrijavanja osnovnog materijala. Prilikom korištenja ove trokomponentne plinske mješavine moguće je zavarivanje prijenosom metala kratkim spojevima, štrcajućim i impulsnim lukom.

### 2.3.8. Položaj pištolja za zavarivanje

Kut između vrha pištolja za zavarivanje i radnog komada utječe na svojstva i izgled dobivenog zavara. Korištenjem lijeve tehnike rada dobiva se lošija penetracija i veće razlijevanje taline dok se korištenjem desne tehnike rada dobiva bolja penetracija i manje razlijevanje taline (Slika 7). Vertikalni (neutralni) položaj zavarivanja je kompromis između lijeve i desne tehnike rada. [4]



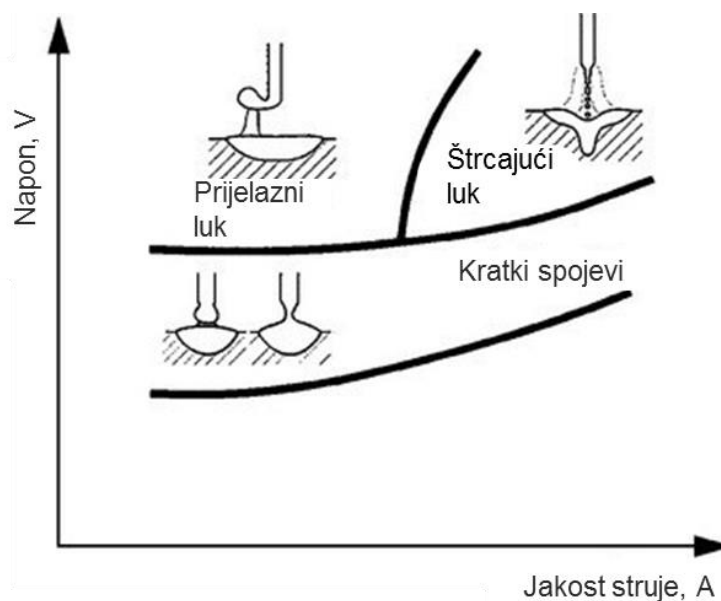
Slika 7. Utjecaj položaja pištolja na izgled zavara [4]

## 2.4. Načini prijenosa metala

Način prijenosa metala moguće je definirati kao mehanizam odvajanja i dinamike gibanja dodatnog materijala od vrha elektrode (žice) do radnog komada. Mijenjanjem kombinacije određenih parametara poput jakosti struje, napona, zaštitnog plina, promjera žice i dr. moguće



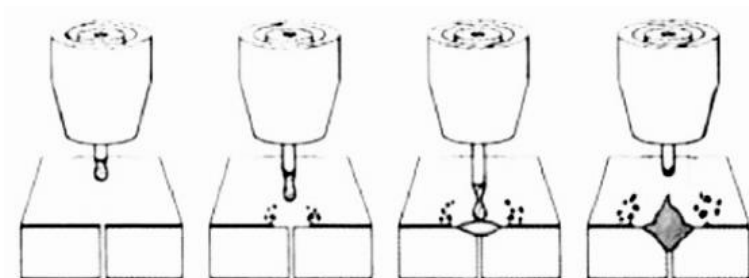
je promijeniti način prijenosa metala [7]. Slika 8 prikazuje ovisnost načina prijenosa metala o struji i naponu.



**Slika 8.** Shematski prikaz ovisnosti načina prijenosa metala o struji i naponu [4]

#### 2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. Short Circuit Transfer)

Prijenos metala kratkim spojevima zasniva se na depozitu kontinuirano dobavljanog dodatnog materijala nastankom električnog kratkog spoja između elektrode i radnog komada. Ciklus odvajanja jedne kapljice sastoji se od faze električnog luka i faze kratkog spoja. Tijekom faze električnog luka uspostavljen je električni luk te se vrh žice (dodatnog materijala) grije i tali – formira se kapljica. Formirana kapljica je većeg promjera od promjera žice. U fazi kratkog spoja dolazi do pojave električnog kratkog spoja (fizičkog kontakta radnog komada i elektrode praćenog naglim porastom jakosti struje i magnetske sile te padom napona) što dovodi do odvajanja kapljice od elektrode i prijenosa na radni komad (Slika 9). Nakon odvajanja kapice ponovno započinje faza električnog luka. Navedeni ciklus se periodički ponavlja od 50 do 250 puta u minuti. [2][7]

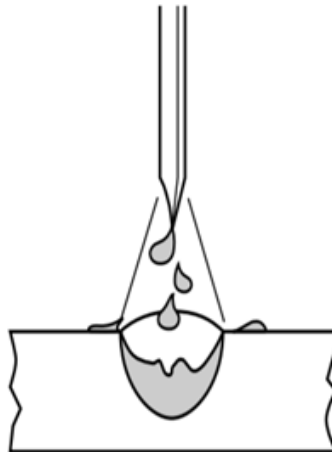


**Slika 9.** Prijenos metala kratkim spojevima [2]

Specifičnost prijenosa metala kratkim spojevima je mali unos topline, odnosno dobivanje taline malog volumena koja se brzo hladi. Ovaj način prijenosa metala se najčešće koristi za zavarivanje tanjih materijala, za korijenske zavare, kod prisilnih položaja, materijala osjetljivih na unos topline ili debljih materijala. Zavarivanje se najčešće provodi u zaštitnoj atmosferi ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i njegovih mješavina. [2][7]

#### **2.4.2. Prijenos metala mješovitim (prijelaznim) lukom (engl. Globular Transfer)**

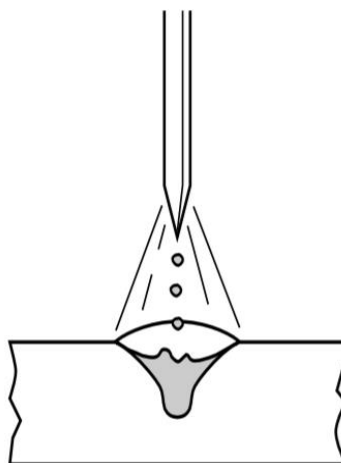
Prijenos metala mješovitim lukom se odvija u području parametara jakosti struje i napona između vrijednosti prijenosa metala kratkim spojevima i onih prijenosa metala štrcajućim lukom. Ovaj prijenos metala karakterizira taljenje kontinuirano dobavljanog dodatnog materijala i stvaranje velikih kapljica koje se pod utjecajem sila u električnom luku odvajaju bez kratkog spoja (Slika 10). Pojedine nasumične kapljice narastu do te razine da dođe do kontakta između elektrode i radnog kontakta, odnosno kratkog spoja. Nasumična pojava kratkih spojeva uzrokuje nestabilnosti postupka. Specifičnost prijenosa metala mješovitim lukom je veliko rasprskavanje, teška kontrola postupka, veliki unos topline te česta pojava pogreški zbog čega se postupak u praksi rijetko koristi. Zavarivanje ovim načinom prijenosa metala se najčešće provodi u zaštitnoj atmosferi čistog ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) ili u mješavinama s njegovim visokim udjelom. [2][7]



**Slika 10.** Prijenos metala mješovitim (prijelaznim) lukom [2]

#### **2.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. Spray Transfer)**

Prijenos metala štrcajućim lukom karakteriziraju visoke vrijednosti jakosti struje i visoke vrijednosti napona. Slika 11 prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom kojeg karakterizira taljenje kontinuirano dobavljanog dodatnog materijala u obliku većeg broja manjih kapljica koje se velikom brzinom odvajaju i zabijaju u radni komad.

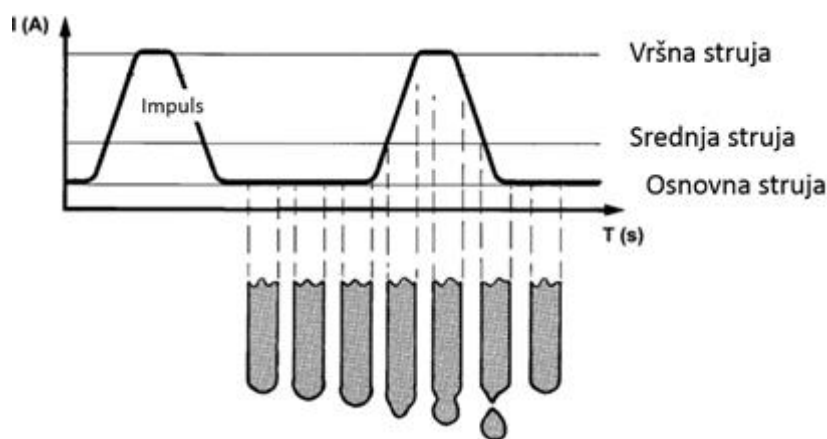


**Slika 11.** Prijenos metala štrcajućim lukom [2]

Specifičnosti prijenosa metala štrcajućim lukom su velika unesena toplina i veliki depozit dodatnog materijala. Ovaj način prijenosa metala se primjenjuje za zavarivanje debljih materijala u vodoravnom položaju. Zaštitne plinske mješavine s pretežnim udjelom argona podržavaju ovaj način prijenosa metala. [7]

#### 2.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom (engl. Pulsed transfer)

Prijenos metala impulsnim lukom se može smatrati visoko kontroliranom varijantom prijenosa metala štrcajućim lukom. Karakteristika ovog načina prijenosa metala je korištenje velikog broja sitnih kapljica za prijenos metala. Jedna kapljica odgovara jednom generiranom impulsu izvora struje. Mogućnost određivanja broja impulsa u sekundi omogućuje preciznu regulaciju količine depozita dodatnog materijala. Vrijednost jakosti struje se u jednom impulsu kreće od vršne do osnovne vrijednosti (Slika 12). Osnovna vrijednost struje održava električni luk stabilnim i omogućava konstantno dovođenje topline dok se porastom jakosti struje na vršnu vrijednost kapljica dodatnog materijala odvaja. Srednja jakost struje je manja od one kod prijenosa metala mješovitim lukom što osigurava dobivanje manjih kapljica dodatnog materijala. [2][7]



**Slika 12.** Prijenos metala impulsnim lukom [2]

Specifičnosti prijenosa metala impulsnim lukom su smanjeni unos topline, smanjeno rasprskavanje zbog generiranja malih kapljica dodatnog materijala te mogućnost korištenja za

sve položaje i debljine materijala. Zavarivanje ovim načinom prijenosa metala se koristi u zaštitnim atmosferama argona ili u smjesama bogatim argonom. [7]

## **2.5. Specifične nepravilnosti kod zavarivanja**

Nepravilnosti koje se mogu pojaviti nakon zavarivanja se mogu podijeliti u tri skupine: metalurške nepravilnosti, konstrukcijske nepravilnosti te nepravilnosti povezane sa samim procesom i postupkom zavarivanja [11].

Metalurškim nepravilnostima se smatraju sve promjene svojstva osnovnog materijala, a najčešće su uzrokovane samim parametrima procesa zavarivanja. Moguće je da se metalurške nepravilnosti pojave u osnovnom materijalu i prije zavarivanja kao posljedica proizvodnje. Konstrukcijske nepravilnosti se javljaju kao posljedica krivih konstrukcijskih rješenja poput izgleda, oblika, pripreme i mogućnosti prilaska određenom spoju. Nepravilnosti povezane sa samim procesom i postupkom zavarivanja su nepravilnosti specifične za pojedini postupak, primjerice uključci volframa su specifični za TIG postupak zavarivanja, dok su uključci troske specifični za REL postupak zavarivanja. [11]

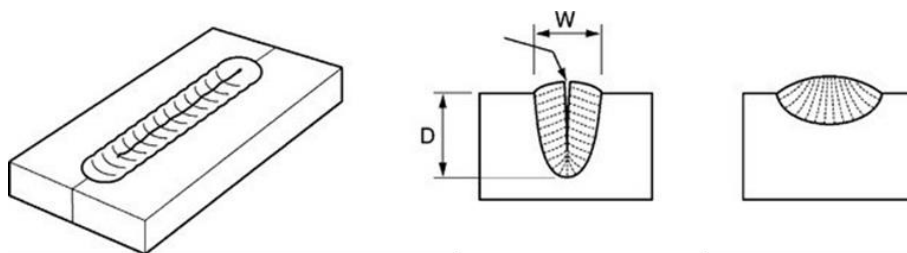
### **2.5.1. Pukotine**

Pukotine se smatraju najopasnijom nepravilnosti koja se može pojaviti u zavarenom spoju te se zbog toga i najviše provjeravaju. U pravilu se ne dopuštaju osim iznimno. Pukotine smanjuju nosivi presjek, a time i čvrstoću zavarenog spoja. Posebno su opasne jer se mogu pojaviti naknadno. Spadaju u skupinu metalurških nepravilnosti. [12]

#### **2.5.1.1. Tople pukotine**

Tople pukotine nastaju na visokim temperaturama (iznad 300 °C) tijekom hlađenja taline. Najčešće se javljaju po granicama zrna materijala orijentirane po dužini i u sredini zavara (Slika 13), ali moguće su i u zoni utjecaja topline (ZUT-u). Tople pukotine nastaju zbog toplinskih naprezanja metala zavara tijekom skrućivanja taline. Pojava im je povezana s nečistoćama u

materijalu, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žljeba, legiranjem te posebno nepravilnim odabirom dodatnog materijala. [12]



**Slika 13.** Topla pukotina [4]

#### 2.5.1.2. Hladne pukotine (Vodikove pukotine)

Hladne pukotine nastaju nakon zavarivanja na nižim temperaturama (ispod 300 °C). Mogu se pojaviti nakon nekoliko sati, a u nekim iznimnim slučajevima i nakon nekoliko dana, zbog čega detekcija istih stvara problem. Najčešće se pojavljuju položene uzdužno ili poprečno na zavar ili na granici miješanja osnovnog i dodanog materijala. Uzrokuje ih nakupljanje vodika u mikropukotinama. Vodik hlađenjem metala nakon zavarivanja prelazi iz atomiziranog stanja u molekularno i popunjava mikropukotine u kojima pritom nastaju visoki tlakovi koji dovode do povezivanja više mikropukotina i nastanka hladnih pukotina. [12][13]

#### 2.5.2. Naljepljivanje i nedovoljni provar

Naljepljivanje se može definirati kao nepostojanje pravilne čvrste veze u zavarenom spoju, odnosno izuzetak fuzije osnovnog i dodatnog materijala u dostatnoj mjeri. Nedovoljni provar se definira kao nedovoljna penetracija (nedovoljno protaljivanje) po presjeku zavarenog spoja. Najčešći uzorci naljepljivanja su nepravilna priprema spoja, neispravni parametri zavarivanja i/ili nepravilna tehnika rada. Naljepljivanje i nedovoljni provar su nepravilnosti geometrijski najslabije pukotinama. Problematične su jer, kao i pukotine, smanjuju čvrstoću zavarenog spoja i mogu biti polazna točka loma u eksploataciji. U pravilu nisu dopuštene. [2][12]

### **2.5.3. Plinski uključci (Poroznosti, šupljine)**

Plinski uključci su područja plina pod tlakom u metalu zavara. Nastaju na način da rastaljeni metal tijekom zavarivanja upije štetne plinove (kisik, vodik, dušik) koji hlađenjem taline stvaraju mjehuriće. Unatoč tendenciji da isplivaju na površinu, mjehurići pod tlakom znaju ostati zarobljeni u metalu. Štetni plinovi najčešće dolaze iz okolne atmosfere i nečistoća na površini dodatnog i osnovnog materijala. Utjecaj na mehanička svojstva je definiran brojem, oblikom i veličinom poroznosti. [12]

### **2.5.4. Čvrsti uključci**

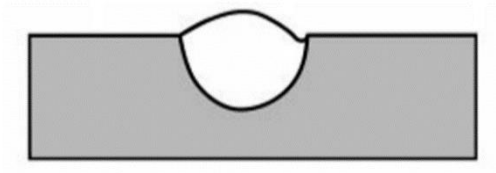
Čvrsti uključci se mogu definirati kao strana tijela u metalu zavara. Mogu se podijeliti na metalne uključke poput volframa i na nemetalne uključke poput troske. Najčešće nastaju kao posljedica nepravilne tehnike rada ili premale brzine zavarivanja. Čvrsti uključci smanjuju čvrstoću zavarenog spoja. Utjecaj na mehanička svojstva je kao i kod plinskih uključaka definiran brojem, oblikom i veličinom poroznosti. [12]

### **2.5.5. Oblik zavara**

Nepravilnostima oblika zavara smatra se svako odstupanje od zadanog oblika zavara (Slika 14). Uz estetski dojam, najčešće imaju i ozbiljan utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Sve nepravilnosti ove vrste su u pravilu dobro vidljive i uočljive vizualnim pregledom. U ovu skupinu nepravilnosti spadaju [12]:

- ugorine uz zavar
- preveliko nadvišenje zavara
- prevelika ispupčenost kutnog zavara
- preveliko nadvišenje korijena zavara (preveliki provar)
- oštar prijelaz zavara
- nesimetričan kutni zavar
- uleknuće površine zavara
- prenizak zavar

- uvučen korijen zavara
- odstupanje od pravca
- itd.



**Slika 14.** Nepravilnost oblika zavara - ugorina [15]

#### **2.5.6. Ostale nepravilnosti**

U ovu skupinu spadaju sve nepravilnosti koje nije moguće svrstati u jednu od prethodnih skupina. To su [12]:

- oštećenje električnim lukom
- onečišćenje kapljicama metala
- mehanička oštećenja površine (osnovnog ili dodatnog) materijala
- podbrušenje.



### 3. ROBOTIZIRANO ZAVARIVANJE

Korištenje robota je najnaprednija vrsta automatizacije [4]. Robot se definira kao automatski, reprogramabilni, višenamjenski manipulator s mogućnošću programiranja i gibanja u više osi s namjenom korištenja u industrijskoj automatici. Uporaba industrijskih robota postaje neophodna, a najčešće se koriste u automobilskoj industriji. Procjenjuje se da se za potrebe zavarivanja koristi gotovo 25 % svih industrijskih robota u primjeni. Robotizirano zavarivanje se u suvremenoj proizvodnji sve više koristi zbog potrebe za povećanjem produktivnosti i smanjenjem cijene proizvodnje, odnosno zbog dobivanja visokokvalitetnih zavara u što kraćem vremenu kako bi tvrtke mogle ostati konkurentne proizvođačima s područja jeftine radne snage poput Kine i sličnih zemalja. Uz to, tvrtke moraju biti fleksibilne i agilne kako bi u što kraćem vremenu mogle odgovoriti na nove dinamične zahtjeve tržišta. [11][14]

Robotizirano zavarivanje je jedna od najuspješnijih primjena industrijskih robotskih manipulatora. Većina današnjih proizvoda se u nekoj od faza montaže zavaruje. Unatoč tome, robotizirano zavarivanje je područje koje se nije puno razvilo te je daleko od gotovog tehnološkog procesa. To je najviše uzrokovano kompleksnošću samog postupka zavarivanja, odabira i regulacije parametara te zahtjevnošću praćenja i kontrole postupka zavarivanja. [14]

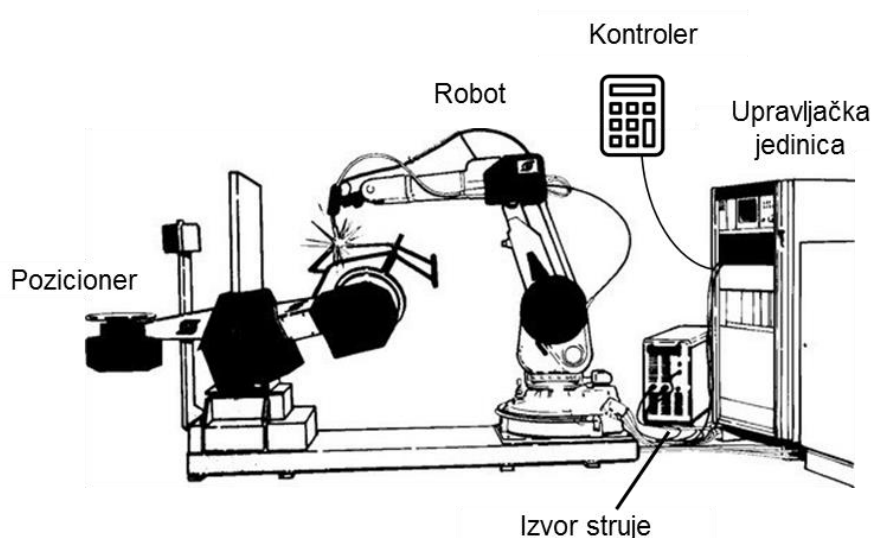
Iskusan i vješt zavarivač kontinuirano tijekom ručnog zavarivanja mijenja i prilagođava parametre zavarivanja ovisno o onome što vidi i što čuje te uz to prilagođava i drži ispravnu poziciju pištolja za zavarivanje. Vješt zavarivač kontinuirano korigira proces zavarivanja, često puta i nesvjesno. Zadatak automatizacije zavarivanja je u što većoj mjeri oponašati rad zavarivača, samo bez elementa ljudske pogreške. Na robota ne utječu raspoloženje, radna atmosfera i sl. Na temelju prethodno provedenih zavarivanja kreiraju se baze podataka iz koji je moguće dobiti potrebne parametre ovisno o ulaznim podacima. Ulazni podaci su, primjerice, tip zavara (npr. kutni zavar), položaj zavarivanja (npr. horizontalni položaj), promjer žice (npr. 1,2 mm) i sl., dok su izlazni parametri na primjer potrebna jakost struje zavarivanja za taj specifičan slučaj, napon, brzina i drugi. [14]

U ovom radu će se u sljedećim poglavljima detaljnije obraditi područje robotiziranog zavarivanja korišteno u kombinaciji s elektrolučnim postupcima, dok se zbog sažetosti rada neće obrađivati elektrootporno robotizirao zavarivanje. Većina robotskih sustava za elektrolučno zavarivanje koristi MIG/MAG postupak ili zavarivanje praškom punjenom žicom (oznaka 136 prema normi HRN EN ISO 4063). Unatoč najčešćoj primjeni u automobilske i građevinske industriji sve je češća primjena kod malih proizvođača čiji broj se konstantno povećava. [11]

### 3.1. Oprema za robotizirano zavarivanje

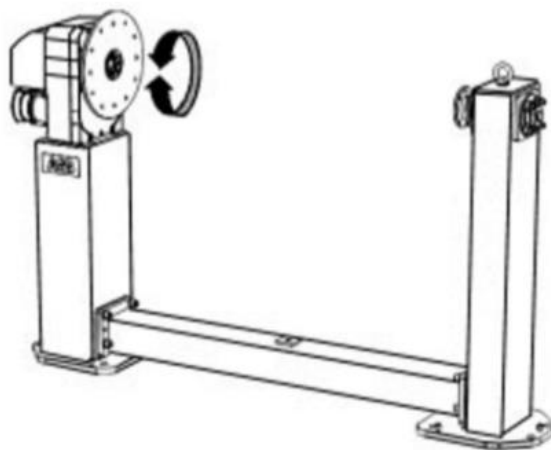
Robotska stanica za zavarivanje MIG/MAG postupkom (Slika 15) se uz opremu za zavarivanje (navedenu i opisanu u poglavlju 2.1) sastoji se sljedećih komponenti [11]:

- robotske ruke (manipulatora)
- upravljačke jedinice robota
- kontrolera – privjeska za učenje (*engl. teachpad*)
- senzora i komunikacijskih kabela
- pozicionera radnog komada (radnog stola)
- jedinice za čišćenje glave pištolja i rezanje žice (opcionalno).



Slika 15. Robotska stanica za MAG zavarivanje [4]

Danas roboti za zavarivanje u pravilu imaju šest stupnjeva slobode, a najčešće se dodaju još jedan ili dva stupnja slobode koje ima pozicioner radnog komada (Slika 16). Pozicioner svojim dodatnim stupnjevima slobode omogućava zavarivanje u optimalnoj poziciji. Dodatno, roboti često nisu fiksni nego imaju mogućnost pomicanja u jednoj ili više osi. Uz danas već uobičajenu uporabu senzora poput dodirnih senzora, senzora za jakost električne struje, napon, brzinu dodavanja žice i sl., sve je češća upotreba optičkih senzora i vizijskih sustava koji se koriste u kombinaciji sa strojnim učenjem i umjetnom inteligencijom kako bi se u pravom vremenu automatski odredila optimalna putanja i u skladu s njom korigirala postojeća putanja. [4][15]



**Slika 16.** Jednoosni pozicioner [15]

### 3.2. Operativne karakteristike robota za zavarivanje

Operativne karakteristike robota za zavarivanje mogu se podijeliti u više skupina, a o njima ovisi izbor robota i primjena istog za specifičnu namjenu. Općenito govoreći, značajke industrijskog robota su:

- nosivost
- broj stupnjeva slobode gibanja
- struktura (izvedba)
- ponovljivost (točnost ponavljanja)
- preciznost (točnost pozicioniranja)
- radni i kolizijski prostor

- vrsta pogona
- cijena
- način upravljanja i programiranja.

Za robotizirano zavarivanje koriste se roboti s električnim pogonom. U 90 % slučajeva se koriste roboti rotacijske strukture sa šest stupnjeva slobode gibanja koji funkcioniraju na sličan način kao i ljudska ruka te pružaju maksimalnu fleksibilnost za pozicioniranje pištolja za zavarivanje. Rjeđe korištene su izvedbe drugačije strukture s manje od šest stupnjeva slobode gibanja. Takve izvedbe se koriste za velike proizvode, primjerice za zavarivanje oplata trupa u brodogradilištima i sl. Nosivost robota se definira pri potpuno ispruženoj ruci, a kod robota za zavarivanje nosivost se kreće u području između 3 kg i 16 kg. Ponovljivost se definira kao sposobnost robota da se vrati u prethodno definiranu poziciju. Ponovljivost robota za zavarivanje je oko 0,1 mm. Za razliku od ponovljivosti, preciznost robota, koja se definira kao sposobnost robota da prijeđe točnu predodređenu udaljenost u određenom smjeru, manja je i teže se mjeri. Prilikom izbora robota potrebno je u obzir uzeti veličinu proizvoda te s obzirom na to odabrati robota s odgovarajućom veličinom radnog prostora. Uz ranije navedeno, u svim područjima robotike, pa tako i u području robotiziranog zavarivanja, važni čimbenici su cijena te način upravljanja i programiranja robota. [11]

### **3.3. Priprema za robotizirano zavarivanje**

Općenito govoreći, za postizanje što bolje kvalitete zavara prije početka samog zavarivanja potrebno je provesti određene pripreme. Površina materijala koji se zavaruju i njena okolina trebaju se očistiti. Prisustvo vlage, oksida, prljavštine, hrđe, masnoće i drugih nečistoća može dovesti do pojave naknadnih nepravilnosti (grešaka). Čišćenje površine posebno dolazi do izražaja kod zavarivanja nehrđajućih čelika i aluminija. U pravilu se dopušta mala zamašćenost čeličnih dijelova [15].

Priprema dijelova koji se zavaruju počinje samim njihovim izrezivanjem. S obzirom na to da su kod robotiziranog zavarivanja dimenzijske tolerancije i tolerancije oblika i položaja vrlo važne i uže nego kod ručnih postupaka, potrebno je odabrati primjeren način rezanja radnih

komada. Najčešće je najbolja metoda rezanja limova mehanički pilom jer se dobiva veća preciznost i produktivnost nego kod plazma ili plinskog rezanja te praktički nema unosa topline. Rezanje vodenim mlazom je dobro i precizno, međutim rijetko se koristi zbog sporosti procesa. [15]

Preporuča se da radni komadi koji se zavaruju budu što uniformnije debljine i istog materijala kako bi se olakšalo programiranje, smanjilo broj potrebnih testnih zavara i olakšalo određivanje parametara zavarivanja. Pojedine dijelove bi trebalo biti jednostavno montirati na pozicioner, a prilikom konstruiranja proizvoda trebalo bi voditi računa o neometanom prilasku pištolja za zavarivanje do svih potrebnih pozicija. Prilikom pozicioniranja dijelova prije zavarivanja potrebno je spriječiti pomicanje komada u slučaju dodira s robotom i eventualno deformiranje zbog zagrijavanja. [15]

### **3.4. Programiranje robota**

Ustaljeni način programiranja robota u kojem operater robota putem kontrolera dovede u željenu poziciju, pohrani poziciju, a zatim odvede do iduće pozicije te ponovno pohrani istu i tako dok ne bude gotov cijeli program, naziva se *online* programiranje. Usporedno sa zadavanjem trajektorije vođenjem robota kroz točke definiraju se način interpoliranja pohranjenih točaka, trenutak uspostave i završetka električnog luka, brzina kretanja robota i zavarivanja, njihanje pištolja za zavarivanje i drugi parametri. Način programiranja putem specijaliziranih računalnih softvera kojima je moguće programirati robota potpuno neovisno o stvarnom robotu, a koje se obavlja na zasebnom računalu, naziva se *offline* programiranje. Korištenjem ovog načina programiranja izbjegavaju se skupi troškovi stajanja robota jer je programiranje robota za zavarivanje dugotrajan i precizan posao. S druge strane, virtualnim programiranjem robota pomoću softvera nije moguće u potpunosti predvidjeti sve čimbenike i uvjete koji neminovno utječu na zavarivanje, tako da *offline* način programiranja ne pruža dovoljnu razinu točnosti jer se odvija u idealnim uvjetima. Hibridna metoda programiranja robota je kompromis između *offline* i *online* metode. Dio programiranja se provodi direktno na samom robotu dok se drugi dio naknadno ili prethodno provodi na računalu. [4][16]

### **3.5. Prednosti robotiziranog zavarivanja**

Prednosti korištenja robotiziranog zavarivanja (u kombinaciji s elektrolučnim postupcima zavarivanja) su [4][15]:

- veća produktivnost (za do 50 %)
- veća brzina
- veća i dosljednija kvaliteta zavara
- poboljšanje radnih uvjeta zavarivača
- odgovor na deficit zavarivača na tržištu.

### **3.6. Nedostatci robotiziranog zavarivanja**

Nedostaci korištenja robotiziranog zavarivanja (u kombinaciji s elektrolučnim postupcima zavarivanja) su [4][15]:

- potreba za kontinuiranom obukom osoblja o upravljanju i programiranju robota
- potrebna izrada dijelova užih tolerancija
- potrebna detaljnija priprema zavarivanja
- kompliciraniji zahtjevi na dizajn proizvoda.

#### 4. Nerazorna ispitivanja

NDT (*engl. Non destructive testing*), odnosno kontrola bez razaranja ili nerazorna ispitivanja, definira se kao svako ispitivanje objekta (uzorka) bez promjene ili modificiranja tog objekta na bilo koji način. Nakon provedenog ispitivanja ispitani objekt je istih svojstva kao i prije ispitivanja te na niti jedan način nisu kompromitirana ili modificirana svojstva i kvaliteta istog samim postupkom ispitivanja. NDT se sastoji od širokog spektra metoda koje se temelje na različitim fizikalnim principima, a koje se provode u svrhu utvrđivanja svojstva materijala, kao i za pronalaženja volumnih i planarnih nepravilnosti nastalih uslijed tehnoloških ili eksploatacijskih uvjeta bez oštećivanja ispitanog uzorka.

Postupci NDT su vrlo važni za praćenje i kontrolu kvalitete kako u samoj proizvodnji tako i naknadno, u eksploataciji raznih objekata i proizvoda. Koriste se u raznim inženjerskim područjima poput strojarstva, petrokemijske industrije, građevine i naftnog rudarstva, ali i u raznim područjima medicine. U strojarstvu se najčešće koriste za ispitivanja zavarenih spojeva, a koriste se i za pregled i kontrolu posuda pod tlakom, cjevovoda, industrijskih proizvoda, raznih konstrukcija i mnogih drugih. [17][18]

Općenito govoreći, u industriji se NDT koristi za:

- ispitivanje sirovog materijala prije proizvodnje
- pregled materijala u vidu kontrole određenog procesa
- ispitivanje završenog proizvoda
- ispitivanje proizvoda i konstrukcija tijekom eksploatacije „po potrebi“ (korektivno održavanje)
- periodičke („tehničke“) preglede određenih proizvoda i konstrukcija (plansko i preventivno održavanje).

U zadnjih 25 godina došlo je do značajnog povećanja i unaprjeđivanja metoda NDT-a. Smatra se da je u današnje vrijeme upravo područje NDT-tehnologija jedno od najbrže rastućih iz perspektive jedinstvenosti tehničkih rješenja i inovativnosti. Bolje razumijevanje svojstva materijala i nagli razvoj informatičke tehnologije pridonijeli su značajnom napretku tehnike

nerazornih ispitivanja te je kao takva prihvaćena i integrirana u gotovo sva područja i djelatnosti, a u mnogim sustavima je esencijalni dio sustava. Smatra se kako je to tehnologija koja je najznačajnije utjecala i doprinijela (povećanju) sigurnosti. [17]

NDT postupci se zasnivaju na procesu koji započinje generiranjem pobude od strane izvora probe. Dolazi do interakcije između ispitivane cjeline i generirane pobude. Interakcija se zasniva na određenom fizikalnom principu i u ovisnosti o principu se manifestira na različite načine. Rezultat te interakcije se naziva odziv, a njega analizator probe registrira i potom analizira. Rezultat NDT ispitivanja je odziv. U skladu s time, detekcija nepravilnosti temelji se na određenom odzivu od nepravilnosti. [18]

Prva faza provođenja NDT ispitivanja je detekcija odziva kojeg smo dobili nakon plasiranja pobude na ispitni uzorak. Svaki detektirani odziv predstavlja indicaciju (naznaku) na postojanje nepravilnosti. Druga faza sastoji se od evaluacije odziva dobivenog u prvoj fazi. Evaluacijom koja najčešće ovisi o znanju i iskustvu ispitnog osoblja dolazi se do zaključka da se (a) radi o lažnoj indicaciji ili (b) zaista postoji nepravilnost u ispitivanom uzorku. Zadnja, treća faza je evaluacija i karakterizacija uočene nepravilnosti. Ovisno o kriteriju prihvatljivosti procjenjuje se radi li se o pogrešci koju je potrebno sanirati, nepravilnosti koju je potrebno pratiti tijekom eksploatacije ili o nepravilnosti koja je zanemariva. [18]

Pouzdanost NDT-a ovisi najvećim dijelom o sposobnosti dobivanja indicacije i sposobnosti tumačenja te indicacije. S druge strane, na uspješnost ispitivanja utječu ispitno osoblje, ispitna oprema i sredstva, ispitni postupci s parametrima i tehnologijom, kao i ispitni objekt sa svojim oblikom, dimenzijom i vrstom materijala [18]. Tijekom svakog ispitivanja važno je osigurati sljedivost<sup>3</sup> upotrebom etalona i referentnih blokova te bilježenjem svih relevantnih parametara u svrhu postizanja ponovljivosti<sup>4</sup> ispitivanja. Bez obzira na korištenu metodu, važnu ulogu u svakom NDT ispitivanju ima ispitivač (inspektor). Rezultati ispitivanja ovise o njegovoj vještini, znanju, pragmatičnosti, sustavnosti i - u velikoj mjeri - iskustvu.

---

<sup>3</sup> Svojstvo mjernog rezultata da se uz danu mjernu nesigurnost može neprekinutim lancem umjeravanja usporediti s definiranom referentnom vrijednosti. [19]

<sup>4</sup> Ponovljivost u ovom kontekstu označava usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima. [19]



#### 4.1. NDT metode

Nerazorna ispitivanja se dijele na metode s obzirom na fizikalne principe (načela) koja koriste. Nerazorna ispitivanja se dijele na tehnike s obzirom na specifičnosti načina provedbe. Podjela na metode i tehnike prikazana je u Tablica 1 [18].

**Tablica 1.** Podjela metoda i tehnika NDT-a [18]

Princip	Metoda	Tehnika
Elektromagnetski valovi	Radiografska (RT)	Radiografija, gamagrafija, XRD, itd.
	Vizualna (VT)	Direktna, endoskopija, ...
	Termografska (IR)	Termovizija, <i>lock in</i> termografija
	Radarska (GPR)	
	Magnetska (MT)	Magnetskim česticama, MFL, itd.
	Vrtložnih struja (ET)	RFEC, ACPD, ECT, ...
Elastični (zvučni) valovi	Ultrazvučna (UT)	Tehnike odjeka, difrakcija
	Akustička (AC)	Akustička emisija, <i>Impact echo</i>
Kontakt	Penetrantska (PT)	Ovisna o vrsti penetranta
	Ispitivanje propusnosti (LT)	Vakuumska, ispitivanje helijem

Svaka NDT metoda ima svoje prednosti i ograničenja, a oni ponajviše ovise o fizikalnom principu koji ta metoda koristi. Pregled prednosti i ograničenja osnovnih najčešće korištenih NDT metoda prikazan je u Tablica 2. NDT metode se međusobno nadopunjuju te se u pravilu u praksi uvijek koristi kombinacija više NDT metoda u jednom ispitivanju [18]. U ovom radu će zbog sažetosti detaljnije biti obrađene samo tehnike korištene u eksperimentalnom dijelu rada, a to su vizualna i metoda ispitivanja penetrantima.

**Tablica 2.** Pregled NDT metoda i njihovih prednosti i ograničenja

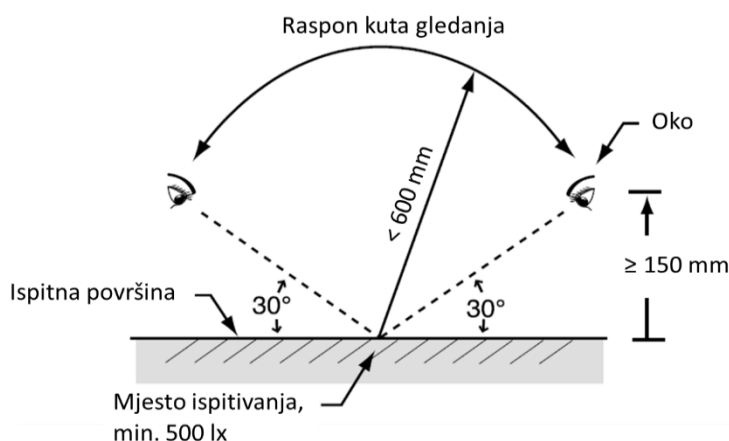
Metoda	Prednosti	Ograničenja
Vizualna metoda (VT)	Metoda koja ne zahtijeva kompleksnu obuku i za koju se koristi relativno jednostavna i jeftina oprema. Priprema površine je jednostavna ili je nema, ima širok raspon primjene.	Ovom metodom se mogu ispitivati i uočiti isključivo površinske nepravilnosti. Površina mora biti dovoljno osvijetljena.
Metoda ispitivanja penetrantima (PT)	Relativno jednostavna metoda s jeftinim sredstvima za rad. Metodu je moguće prilagoditi ovisno o određenoj situaciji i zahtijeva minimalni trening.	Metoda se može koristiti isključivo za diskontinuitete otvorene prema površini. Potrebno je kondicioniranje površine (površina mora biti relativno glatka i očišćena).
Metoda ispitivanja magnetskim česticama (MT)	Relativno jednostavna metoda s jeftinim sredstvima za rad. Gotovo trenutni rezultati i velika osjetljivost. Nema potrebe za detaljnom pripremom površine. Bez ograničenja veličine ispitnog objekta.	Metodom je moguće ispitivati jedino feromagnetne materijale i detektirati diskontinuitete na ili pri površini. Ponekad je potrebno demagnetizirati ispitni uzorak. Glavna os nepravilnosti mora sjeći os magnetiziranja.
Radiografska metoda (RT)	Metoda omogućava trajni zapis rezultata ispitivanja (radiogram). Ima visoku osjetljivost i svestrana je. Volumetrijska metoda s najširokom primjenom.	Metoda ima ograničenje na debljinu. Orijentacija diskontinuiteta ima utjecaja na ispitivanje. Oprema može biti velika i nezgrapna, a uz to postoji opasnost od radijacije.
Metoda ispitivanja ultrazvukom (UT)	Moguće je ispitivanje većine materijala, oprema je lagana i prijenosna, a omogućava dobivanje preciznih rezultata. Jedna od volumetrijskih metoda. Dovoljno da je dostupna samo jedna površina objekta.	Metoda ima ograničenje na materijale nepogodne geometrije i određenih akustičkih svojstava. Pravilna interpretacija rezultata ispitivanja je zahtjevna i zahtijeva puno znanja i iskustva ispitivača.
Metoda vrtložnih struja (ET)	Jednostavna i lako prijenosna oprema, nema dodatnih sredstva za rad (tekućina i sl.). Rezultati ispitivanja se dobivaju trenutno i nema potrebe za prethodnom pripremom površine	Ograničena debljina uzoraka koji se mogu pregledavati ovom metodom. Metoda je ograničena ovisno o svojstvima materijala koji se ispituje.

#### 4.1.1. Vizualna metoda (VT)

Unatoč tome što je vizualna metoda (*visual testing*) osnovna i najstarija NDT metoda u industriji nerazornih ispitivanja, koja je u uporabi od samih začetaka, ujedno je i posljednja koja je službeno priznata. Dugo vremena je bila zanemarivana i podcjenjivana [17]. Vizualna metoda u gotovo svim slučajevima ima preventivnu ulogu [18].

Vizualna metoda NDT-a se definira kao promatranje površine objekta sa ili bez raznih pomagala u cilju otkrivanja nepravilnosti (dislokacija, nesavršenosti, diskontinuiteta, pukotina, ...) na površini objekta. S obzirom na to koriste li se pomagala ili ne, razlikuje se direktna i indirektna (posredna) tehnika pregleda površine. Da bi vizualno ispitivanje bilo uspješno, potrebno je zadovoljiti određene zahtjeve (Slika 17) [17][18]:

- Za detaljan pregled udaljenost oka od ispitne površine mora biti manja od 600 mm, ako taj uvjet nije zadovoljen radi se o općem pregledu.
- Udaljenosti između oka i površine mora biti veća od 150 mm (optimalno je ~300 mm).
- Ispitnu površinu je potrebno promatrati pod kutom većim od 30°.
- Osvijetljenost ispitne površine mora biti minimalno 500 lx.
- Educiranost i certificiranost ispitnog osoblja (sposobnost prepoznavanja indikacija, medicinska potvrda o ispravnosti vida, ...)



Slika 17. Tehnički zahtjevi kod vizualne metode [17]

Metoda vizualne kontrole provodi se prije svih drugih metoda nerazornih ispitivanja te je relativno jeftina i jednostavna. Ograničenje vizualne metode je u tome što je potrebno da na direktan ili indirektan način svjetlost mora moći putovati od instrumenta do ispitivane površine. Drugi nedostatak je u tome što je s vizualnom metodom moguće detektirati isključivo površinske nepravilnosti. Vizualni pregled se provodi u svim fazama razvoja proizvoda počevši od stanja sirovca ili ingota, višestruko tijekom procesa proizvodnje pa sve do gotovog proizvoda i tijekom same eksploatacije. Vizualni pregled koristi se u gotovo svim tehničkim područjima i strukama. [17]

#### 4.1.1.1. *Direktna tehnika*

Kod direktne tehnike vizualnog NDT pregleda površine, oko ispitivača je u funkciji receptora informacije - svjetlosti koja putuje od izvora svjetlosti preko površine ispitnog objekta (gdje se reflektira) sve do oka. Informacija (svjetlost) je skup elektromagnetskih valova vidljivih ljudskom oku. To su elektromagnetski valovi valne duljine u području od 380 do 770 nm. Svjetlost koja dopiye do oka se prolaskom kroz rožnicu i leću usredotočuje na fotosenzitivnu mrežnicu. Na mrežnici se nalaze vidne (fotoreceptorske) stanice čunjići i štapići koji elektromagnetske valove (energiju) kompleksnim procesima pretvaraju u impulse (bioelektricitet) koji se potom preko očnog živca (*lat. nervus opticus*) prenose do mozga gdje se obrađuju, analiziraju i gdje se tvori slika [17][20]. Kod direktne tehnike dopuštena je uporaba pomagala (poput povećala, alata za mjerenje, mjerila i dr.).

#### 4.1.1.2. *Indirektna tehnika*

Ako osnovni zahtjevi za vizualnu metodu NDT-a ne mogu biti zadovoljeni zbog nepristupačnosti (npr. nije zadovoljen uvjet udaljenosti), vizualnom ispitivanju se pristupa s pomagalima i opremom. Tada se radi o indirektnoj, odnosno posrednoj tehnici vizualne metode NDT-a (RVI – *engl. remote visual inspection*). Kod indirektna tehnika se koriste razna pomagala poput ogledala, kamera i endoskopa (fibroskopa, boroskopa, videoskopa) kako bi se što bolje nadomjestio direktan pregled ispitne površine [17][18]. Značajan razvoj elektronike i informatike u zadnjih 20-ak godina potaknuo je poboljšanje opreme za indirektnu tehniku

vizualnog pregleda do te mjere da je u pojedinim situacijama indirektna tehnika pouzdanija od direktne. Za primjer se mogu uzeti digitalne kamere koje su u širokoj uporabi, a koje su izrazito malih dimenzija, rezolucije i kvalitete fotografija dostojne profesionalnih fotoaparata. Takva tehnologija implementirana u primjerice jedan endoskop u sprezi sa suvremenim softverem omogućuje prikaz uživo, obradu, snimanje i naknadno prikazivanje i analizu visokokvalitetnih videozapisa ispitnog uzorka. Razvojem tehnologije pomiču se ograničenja (ne)dostupnosti.

#### **4.1.2. Metoda ispitivanja penetrantima (PT)**

Metoda ispitivanja penetrantima jedna je od najstarijih i najjednostavnijih metoda NDT-a. Može se reći da je to, u današnje vrijeme, najčešće korištena nerazorna metoda za ispitivanje površine materijala jer ju je moguće koristiti praktički na svim neporoznim materijalima. Razlikuje se mnogo tehnika metode ispitivanja penetrantima, a samim time se na korištenje dobiva široki spektar osjetljivosti te metode, koja omogućuje ispitivanje uzoraka varijabilnih dimenzija i oblika. [17]

Metoda ispitivanja penetrantima je postupak kojim je moguće otkrivanje površinskih prekidnosti ispitnog uzorka (odnosno isključivo nepravilnosti koje su otvorene prema površini), a u posebnim slučajevima i otkrivanje propusnosti materijala. Metoda se zasniva na fizikalnom principu kapilarnosti. Kapilarnost je pojava gibanja tekućine uz rub uskih cijevi (kapilara), a uzrokovana je silama adhezije<sup>5</sup> i kohezije<sup>6</sup>. Nakon nanošenja tekućine (penetranta) na stijenu ispitnog uzorka dolazi do ulaska tekućine u kapilare neovisno o samoj poziciji kapilare. Sile koje se javljaju u kapilarnosti su jače od gravitacijske sile tako da je ovom metodom moguće ispitivanje i nadglavnih pozicija.

---

<sup>5</sup> U fizici pojava međusobnog privlačenja površina dvaju tijela načinjenih od različitih tvari zbog djelovanja elektromagnetskih sila među molekulama. [20]

<sup>6</sup> Privlačna međuatomska ili međumolekularna sila koja djeluje između susjednih čestica tvari. Najjača je u tvarima koje su u čvrstom stanju, a slabija u tekućinama. Jedno je od očitovanja djelovanja kohezije površinska napetost. [20]

Za uspješno provođenje postupka ispitivanja metodom ispitivanja penetrantima, ispitivanje se mora odvijati u uvjetima temperature okoline od 10 °C do 50 °C. Za promatranje obojenih penetranta mora biti osigurana razina osvjetljenosti od minimalno 500 lx, dok kod fluorescentnih<sup>7</sup> penetranta mora biti osigurano ultraljubičasto zračenje (UV) od minimalno 1000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , a maksimalna osvjetljenosti 20 lx. Ako su zadovoljeni svi zahtjevi moguće je uočavanje pukotina širine 1  $\mu\text{m}$ , dubine 10  $\mu\text{m}$  i duljine 100  $\mu\text{m}$ . Važno je da na površini ispitivanog uzorka nema (ostataka) boje ili hrđe, koja mora biti prethodno oprezno uklonjena metodama koje ne mogu dovesti do zatvaranja eventualnih kapilara (primjerice četkanje i kemijsko čišćenje je dopušteno, dok su postupci poput sačmarenja i pjeskarenja dopušteni samo u iznimnim slučajevima uz povećani oprez). [18]

Oprema za ispitivanje penetrantima varira od jednostavnih prijenosnih setova do kompleksnih automatiziranih linijskih ispitnih sustava. Unatoč razini automatiziranosti sam pregled ispitnih uzoraka mora obaviti ispitivač (inspektor). Ručni setovi se sastoje od: penetranta skladištenog u limenkama pod tlakom, odstranjivača (koji se upotrebljava za pripremu površine), razvijaača (koji se nanosi nakon penetranta, a „izvlači“ penetrant iz pora na površinu) i pomoćnih sredstava poput čistaća i emulgatora [17][18].



**Slika 18.** Ispitivanje penetrantom crvenog pigmenta [21]

Iskustvo je pokazalo da je ljudskom oku najlakše uočiti kontrast između ispitnog uzorka i penetranta kada je penetrant crvene boje (Slika 18). Upravo se zbog što lakšeg uočavanja

<sup>7</sup> Vrsta luminiscencije koja se pojavljuje za vrijeme trajanja pobude. Luminiscencija je emisija elektromagnetskog zračenja (pretežno vidljive svjetlosti) koje nije pobuđeno povišenom temperaturom tvari, nego je posljedica primanja energije u nekom drugom obliku. [20]

koriste i fluorescentni penetranti (Slika 19). Kad se gledaju pod crnim svjetlom<sup>8</sup> fluorescentni penetranti pružaju višestruko bolji kontrast od onog koji daje crveni penetrant pod običnim svjetlom. Uz prethodne zahtjeve važno je da se penetrant jednostavno uklanja s površine, da nema kemijske interakcije između njega i ispitnog materijala, da ne isparava, itd. [17]



**Slika 19.** Ispitivanje fluorescentnim penetrantom [22]

Postupak NDT metode ispitivanja penetrantima provodi se točno definiranim redoslijedom koji se sastoji od sljedećih faza [17][18]:

- pripreme površine
- apliciranja penetranta
- uklanjanja viška nanesenog penetranta (odstranjivačem)
- apliciranja razvijaa
- promatranja i praćenja razvoja indikacija
- pregleda i bilježenja indikacija
- završnog čišćenja.

---

<sup>8</sup> Crno svjetlo zrači svjetiljka koja emitira u dugovalnom ultraljubičastom području (UVA - dužina vala oko 360 nm), emitira vrlo malo vidljive svjetlosti. [17]

NDT metodom ispitivanja penetrantima moguće je detektirati pukotine u zoni utjecaja topline (ZUT), lošu penetraciju zavara, pukotine uzrokovane naknadnom toplinskom obradom, vodikove pukotine, pukotine uzrokovane umorom materijala, kao i mnoge druge. Nadalje, metoda je jeftina, ima visoku osjetljivost i jednostavnu opremu. Ograničenja metode su mogućnost detektiranja samo površinske diskontinuitete, mnogo je varijabli tijekom samog postupka o kojima je važno voditi brigu, rezultati mogu varirati ovisno o temperaturi te je potrebna priprema površine. Nakon uočavanja linearne indikacije moguće je samo izmjeriti duljinu iste, a ne stvarnu duljinu pronađenih linearnih nepravilnosti. Također, nije moguće odrediti dubinu pukotine. Još jedan od nedostataka je to što je postupak često vrlo neuredan [17][18]

Pouzdanost metode ispitivanja penetrantima ovisi o vrsti penetranta i opremi za ispitivanje, stanju površine, vremenima čekanja (prodiranja i razvijanja) kao i o uvjetima promatranja i dr. Penetrantski sustavi dijele se prema [18]:

- obojenosti (na obojene i fluorescentne)
- načinu odstranjivanja viška materijala
- osjetljivosti.

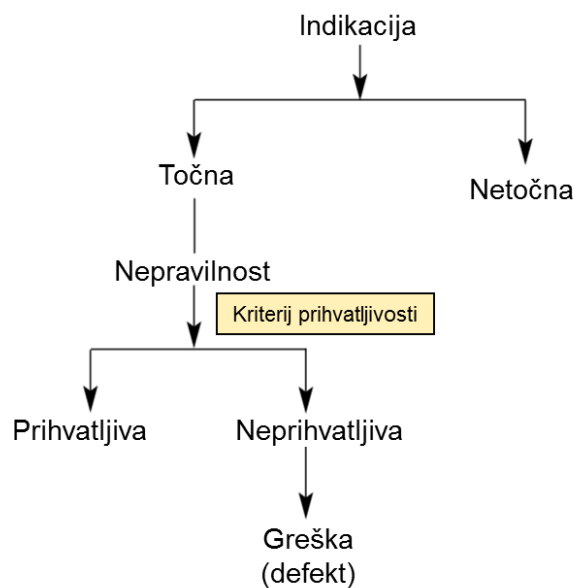
Metoda ispitivanja penetrantima pogodna je, zbog jednostavne i lako prijenosne opreme, za terenska ispitivanja, a vrlo je pogodna i za korištenje u samoj proizvodnji gdje se veliki broj komada može obraditi u relativno kratkom vremenskom roku [17]. Koristi se za ispitivanje u brojnim industrijama i područjima, na praktički svim neporoznim materijalima.

## **4.2. Kriterij prihvatljivosti**

Nakon svakog provedenog NDT ispitivanja potrebno je za uočene indikacije odrediti jesu li točne ili ne. Indikacije koje se pokažu točnima nazivaju se nepravilnosti (diskontinuiteti). Za svaku pojedinu nepravilnost se odlučuje, ovisno o kriteriju prihvatljivosti, je li prihvatljiva ili nije. Ako diskontinuitet zadovoljava kriterij prihvatljivosti, njegovo postojanje ne kompromitira tehnička i mehanička svojstva (u bitnoj mjeri). Ako nepravilnost ne zadovoljava kriterij prihvatljivosti naziva se greškom (defektom), a potrebna je sanacija istog jer svaka



greška u određenoj mjeri utječe na tehnička i mehanička svojstva. Dijagram toka Indikacija – Nepravilnost – Greška prikazan je na Slika 20. U određenim slučajevima potrebni su periodički pregledi nepravilnosti jer pojedina nepravilnost trenutno zadovoljava kriterij prihvatljivosti, ali je zbog vrste iste izgledno da će doći do napredovanja pa ju je potrebno kontrolirati. [18]



**Slika 20.** Dijagram toka Indikacija – Nepravilnost – Greška [18]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada analizirana je zavarena struktura kotla prikazana na Slika 21. Analizirana struktura je robotski zavarena. Kotao služi za grijanje kućanstva, a unutar sebe ima ugrađeni sustav izmjenjivača topline kojim se zagrijava radni medij. Očekivani vijek trajanja kotla je 10 godina.. Osnovne informacije o radnom mediju dobivene od proizvođača su prikazane u Tablici 3.

Struktura kotla ima problem propuštanja na spojevima limova - zavarima. Struktura je vizualno pregledana te fotodokumentirana. Utvrđene su, a potom i nomenklaturirane pozicije kritičnih mjesta na kojima dolazi do propuštanja. Na kritična mjesta je ukazao sam proizvođač. Nakon toga je provedeno ispitivanje propusnosti pozicija penetrantom. Rezultati ispitivanja penetrantom su analizirani i dokumentirani te se pristupilo izradi makroizbrusaka. Izrađeno je sedam makroizbrusaka koji su također analizirani i fotodokumentirani. Na temelju svega navedenog donesen je zaključak o trenutnoj tehnologiji proizvodnje zavarene strukture kotla i uzročno-posljedičnoj povezanosti s pojavom nepravilnosti u strukturi zavara, odnosno s pojavom propuštanja. Izrađen je prijedlog nove tehnologije zavarivanja sa svim potrebnim parametrima kojom bi se trebao spriječiti nastanak nepravilnost i problem propuštanja kao i povećati produktivnost. Provedena je komparativna analiza stare i nove tehnologije zavarivanja koja je prikazana tablično. Novom tehnologijom je zavaren niz probnih uzoraka od kojih je dio potom ispitan vizualno i penetrantom. Izrađeni su i makroizbrusci probnih uzoraka te su analizirani i uspoređeni s makroizbruscima izrađenim iz strukture kotla koja je dobivena od proizvođača.



**Slika 21.** Stražnja i prednja strana kotla

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje i dijelom u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu tijekom ljetnog semestra akademske godine 2020./2021.

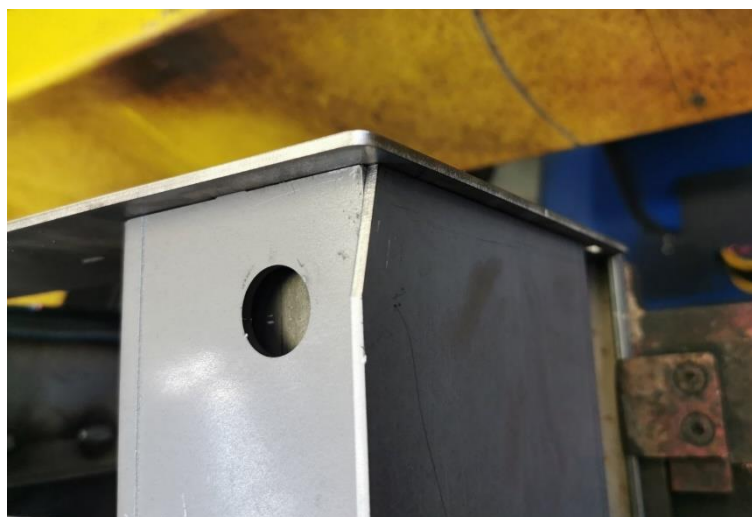
**Tablica 3.** Informacije o radnom mediju

<b>Tlak medija</b>	
Min. radni tlak:	0,8 – 1,0 bar
Nominalni radni tlak	1,5 – 2,0 bar
Max. tlak (prekid rada)	3,0 bar
<b>Temperatura medija</b>	
Polazna (max.)	80 °C
Povratna (min.)	60 °C
Razlika (polaz – povrat)	$\Delta t = 20 \text{ °C}$
Max temp. (prekid rada)	110 °C

Kotao je izrađen od čeličnog lima oznake DD12 (oznaka 1.0398), čija su mehanička i kemijska svojstva propisana prema normi EN 10111. Radi se o toplo valjanom dekapiranom čeliku debljine 3 mm predviđenom za hladno deformiranje. Čelik je moguće zavarivati svim uobičajenim postupcima zavarivanja bez predgrijavanja [23]. Svojstva materijala korištenog za izradu strukture kotla su navedena u Tablica 4. Na Slika 22 je prikazana pozicija 1a prije samog zavarivanja.

**Tablica 4.** Svojstva čeličnog lima DD12 **Error! Reference source not found.** 1]

Mehanička svojstva materijala					
$R_{el}$ <i>Granica elastičnosti</i>		$R_m$ <i>Vlačna čvrstoća</i>		A <i>Istezanje</i>	
272 N/mm <sup>2</sup>		373 N/mm <sup>2</sup>		42 %	
Udio legirnih elemenata					
C <i>Ugljik</i>	Mn <i>Mangan</i>	P <i>Fosfor</i>	S <i>Sumpor</i>	Si <i>Silicij</i>	Al <i>Aluminij</i>
0,068 %	0,0378 %	0,009 %	0,011 %	0,009 %	0,030 %

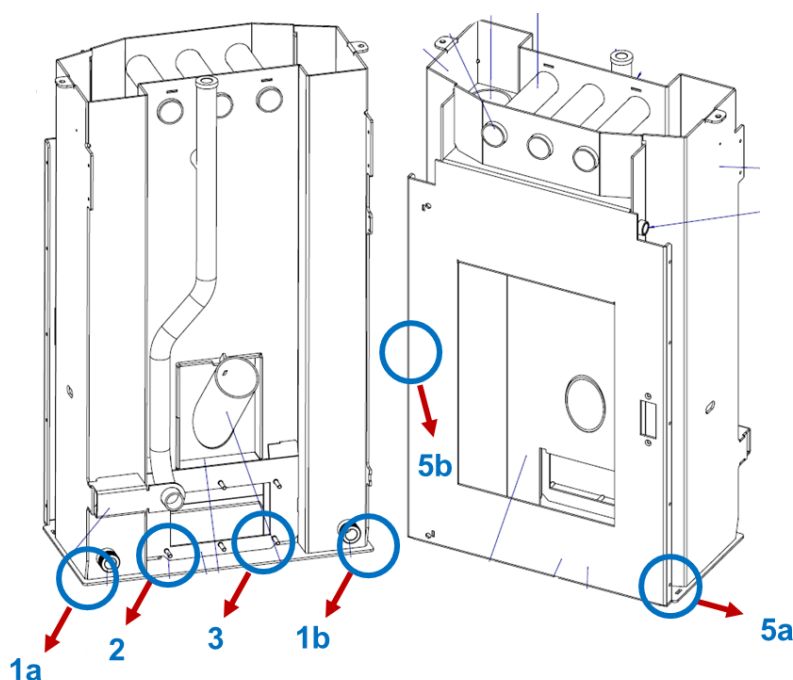


**Slika 22.** Pozicija 1a prije zavarivanja[24]

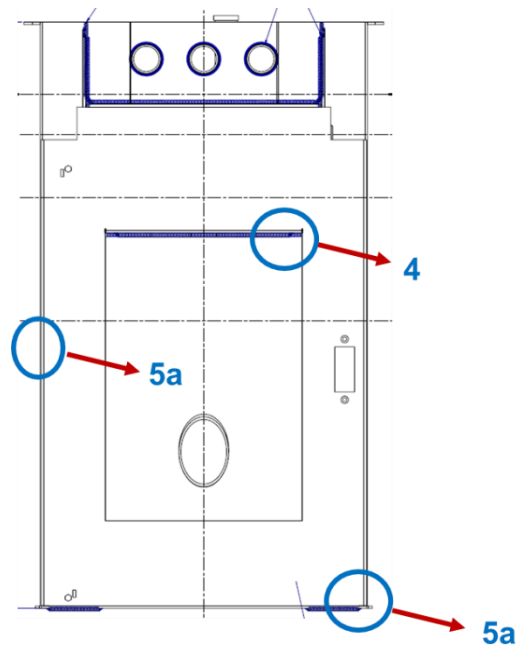
### 5.1. Definiranje i nomenklatura kritičnih pozicija

Prije samog detaljnog pregleda strukture kotla NDT metodama bilo je potrebno definirati i imenovati pozicije za koje se ispostavilo da u eksploataciji imaju najviše problema s propuštanjem. Propuštanje se može definirati kao greška u zavaru koja omogućuje nekom tekućem ili plinovitom mediju da prođe kroz zavar. Propuštanje se očituje iz razloga pukotina koje su tako orijentirane i takve duljine da medij može s jedne strane stijenke materijala proći kroz tu pukotinu na drugu stranu. Sustav pukotina može biti dugačak i desetke centimetara.

Odabrano je 7 kritičnih pozicija propuštanja na koje je ukazao sam proizvođač. Pozicije su označene kombinacijom brojeva i slova. Prikaz svih pozicija prikazan je na Slika 23 i Slika 24. Navedene pozicije su detaljnije pregledane vizualno, ispitane penetrantom te su izrađeni makroizbrusci iz područja istih.



**Slika 23.** Kritične pozicije propuštanja kotla I[24]



**Slika 24.** Kritične pozicije propuštanja kotla II[24]

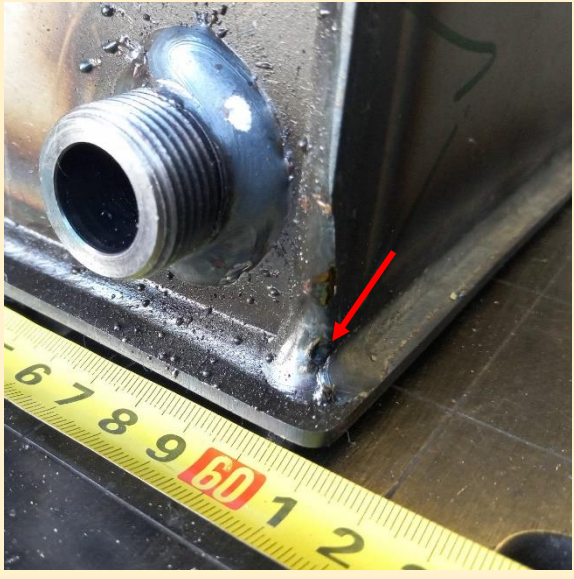
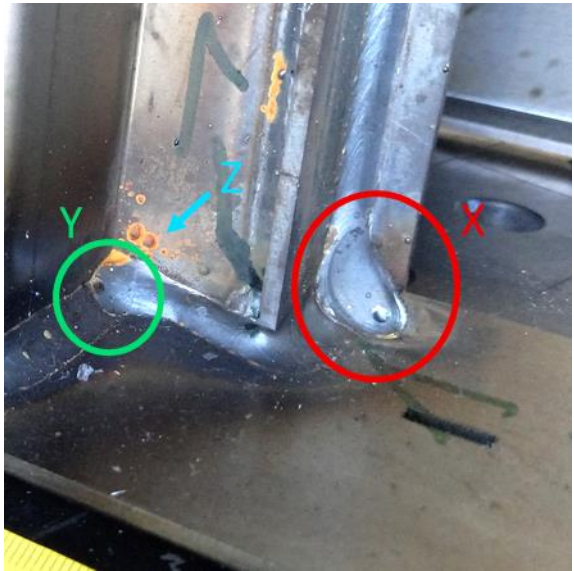
## 5.2. Vizualni pregled (VT)

Vizualnim pregledom strukture kotla pregledani su svi zavari, a posebno oni za koje se ustvrdilo da predstavljaju kritična mjesta za propuštanje. Svi zavari sumnjive kvalitete i izgleda su fotodokumentirani. Vizualnim pregledom je utvrđeno da na pojedinim zavarima strukture kotla ima nepravilnosti. Detaljniji prikaz pozicija i uočenog vizualnim pregledom je prikazano u Tablica 5.

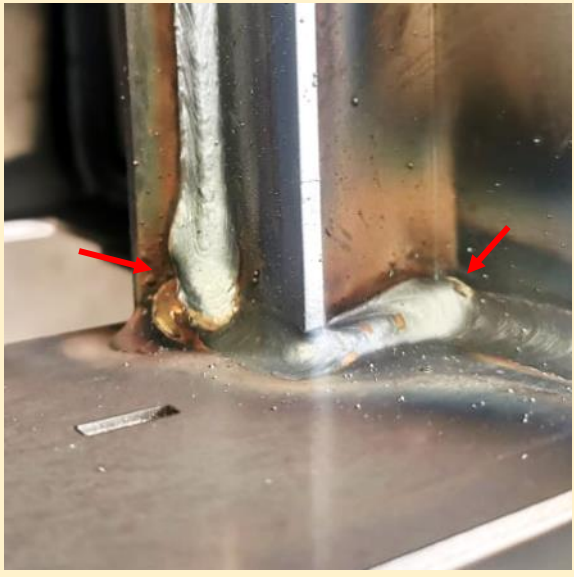

**Tablica 5.** VT pregled kritičnih pozicija



Pozicija	Uočeno	Fotografija
<b>1a</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Izraženo rasprskavanje u području zavora (onečišćenje kapljicama metala)</li> <li>- višestruki prijelaz zavora preko iste točke</li> <li>- opći izgled zavora pravilan osim mjesta završetka tri zavora iz tri različite ravnine (vidljivo na slici) gdje su vidljive pogreške oblika zavora i potencijalno naljepljivanje.</li> </ul>	



Pozicija	Uočeno	Fotografija
1b	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Izraženo rasprskavanje u području zavora (onečišćenje kapljicama metala)</li> <li>- višestruki prijelaz zavora preko iste točke</li> <li>- opći izgled zavora pravilan osim mjesta završetka tri zavora iz tri različite ravnine gdje su vidljive pogreške oblika zavora u vidu ispuččenja zavora i naljepljivanje.</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vidljivo naljepljivanje (oznaka X)</li> <li>- rasprskavanje u području zavora (onečišćenje kapljicama metala – oznaka Z)</li> <li>- nepravilno izveden nastavak vertikalnog zavora (oznaka X)</li> <li>- nepravilno izveden nastavak horizontalnog zavora (oznaka Y).</li> </ul>	

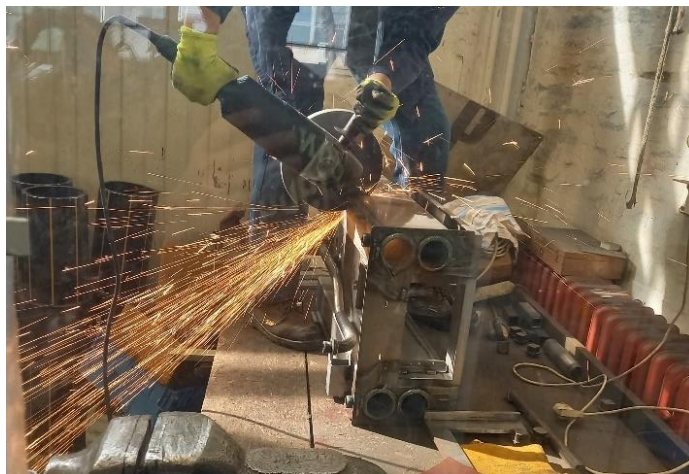


Pozicija	Uočeno	Fotografija
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nepravilan oblik i izgled zavora (neravnomjerna širina i površina zavora te neravnomjerna visina zavora)</li> <li>- nepravilno izveden nastavak vertikalnog zavora</li> <li>- izraženo naljepljivanje</li> <li>- rasprskavanje (onečišćenje kapljicama metala)</li> <li>- nepravilno izvedena promjena smjera zavora.</li> </ul>	
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nepravilan oblik i izgled zavora prilikom promjene smjera vođenja zavora (u kutu)</li> <li>- nepravilno izveden nastavak zavora</li> <li>- mjestimice vidljivo rasprskavanje (onečišćenje kapljicama metala)</li> <li>- izuzev navedenog, ostatak zavora je urednog izgleda.</li> </ul>	

Pozicija	Uočeno	Fotografija
5a	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vertikalni zavar je urednog izgleda bez naznaka nepravilnosti</li><li>- nepravilno izveden nastavak zavara (početak horizontalnog zavara)</li><li>- promjene smjera vođenja zavara uredne</li><li>- ostatak zavara urednog izgleda.</li></ul>	
5b	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vertikalni zavar urednog oblika i dimenzija</li><li>- mjestimično vidljivo rasprskavanje (onečišćenje kapljicama metala) po površini zavara</li><li>- ostatak zavara urednog izgleda.</li></ul>	

### 5.3. Ispitivanje penetrantom (PT)

Nakon provedenog vizualnog pregleda robotski zavarene strukture kotla pristupilo se razrezivanju kotla na veće komade uz pomoć osoblja Laboratorija za zavarivanje. Razrezivanje je bilo potrebno da bi se moglo pristupiti određenim pozicijama tijekom ispitivanja penetrantom. Svrha ispitivanja strukture kotla penetrantom bila je utvrditi dolazili li do propuštanja na kritičnim pozicijama i ako dolazi koje su to pozicije. Korištena je oprema za ispitivanje proizvođača *Magnalux* odnosno odstranjivač (*engl. cleaner*) oznake SKC-S, crveni penetrant oznake SKL-WP2 te razvijač oznake SKD-S2.



**Slika 25.** Razrezivanje kotla na veće dijelove zbog provođenja ispitivanja penetrantom

Nakon razrezivanja koje je prikazano na Slika 25 provedeno je ispitivanje penetrantom. Za početak je površina kritičnih pozicija očišćena i odmašćena odstranjivačem. Nakon toga je apliciran penetrant s jedne strane ispitivane stijenke. S druge strane ispitivane stijenke u području zavora na kritičnim pozicijama je nanesen razvijač. Nakon izvjesnog vremena je došlo do propagacije crvenog penetranta kroz materijal zavora do druge strane stijenke. Do propuštanja je došlo na Poziciji 2 što je vidljivo iz Slika 26, na Poziciji 3 što je vidljivo na Slika 27 i Poziciji 4 što je vidljivo na Slika 28, a sve u skladu s Tablica 6.

**Tablica 6.** Rezultati ispitivanja propuštanja penetrantom

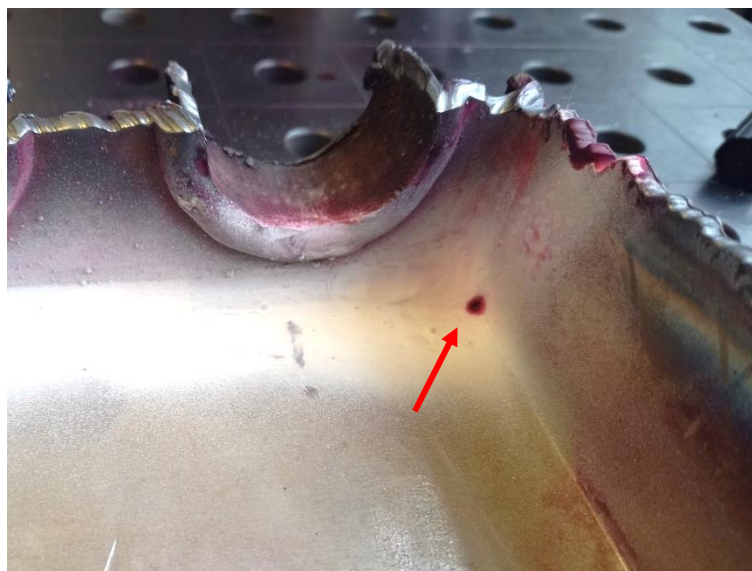
Ispitivanje propuštanja		
Oznaka pozicije	Propuštanje [Da / Ne]	Slika
1a	Ne	-
1b	Ne	-
2	Da	Slika 26
3	Da	Slika 27
4	Da	Slika 28
5a	Ne	-
5b	Ne	-

**Slika 26.** Propuštanje Pozicije 2





**Slika 27.** Propuštanje Pozicije 3



**Slika 28.** Propuštanje Pozicije 4

#### 5.4. Izrada i analiza makroizbrusaka

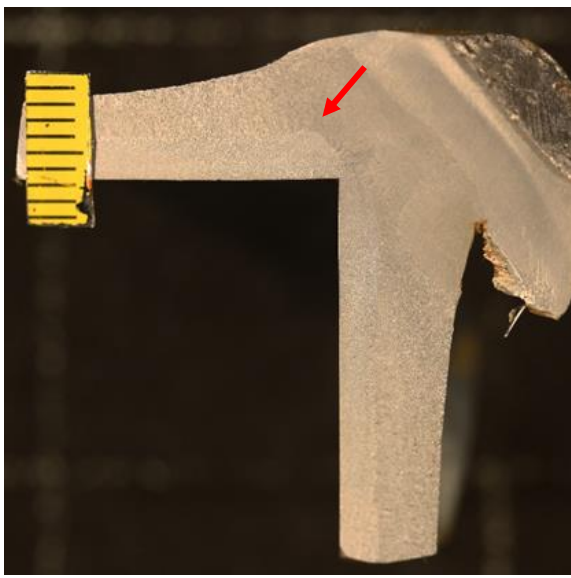
Nakon ispitivanja nanošenjem penetranta struktura kotla je poslana na daljnje čišćenje i razrezivanje. Izrađeno je sedam makroizbrusaka u skladu s normom HRN EN ISO 17639:2013 i kritičnim pozicijama definiranim u poglavlju 5.1. Makroizbrusci su izrađeni u Laboratoriju za materijalografiju. Nakon izrezivanja uzorci su očišćeni od ostatka penetranta i razvijača, a zatim su obrađeni brusnim papirom od najgrublje (320) do najfinije granulacije (4 000) na uređaju za ručno poliranje *Presi Minitech 233* prikazanom na Slika 29. Nakon toga su, u skladu s normom HRI CEN ISO/TR 16060:2018, nagrizeni otopinom 3,0 % (tropostotnog) nitala u trajanju od 10 sekundi. Svih sedam makroizbrusaka je potom fotodokumentirano i analizirano. U Tablica 7 je prikazana fotografija i analiza svakog makroizbruska zasebno. Uz to, gdje je bilo moguće, su uspoređene visine zavara definirane u nacrtu i stvarne visine te je određena razina kvalitete u skladu s HRN EN ISO 5817:2014.



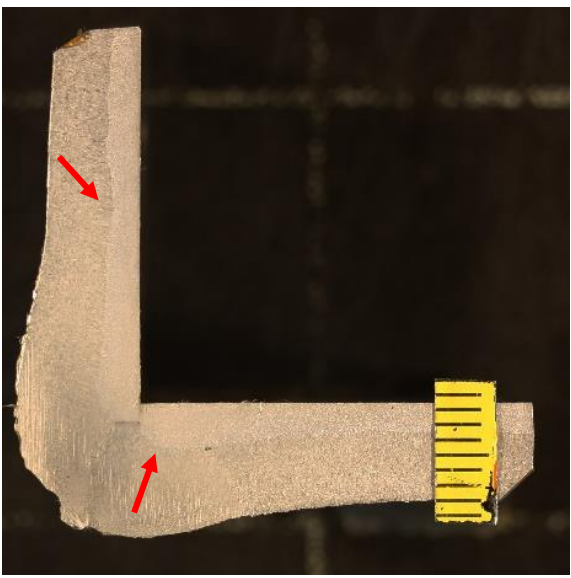
**Slika 29.** Uređaj za ručno poliranje *Presi Minitech 233*

Tablica 7. Analiza makroizbrusaka

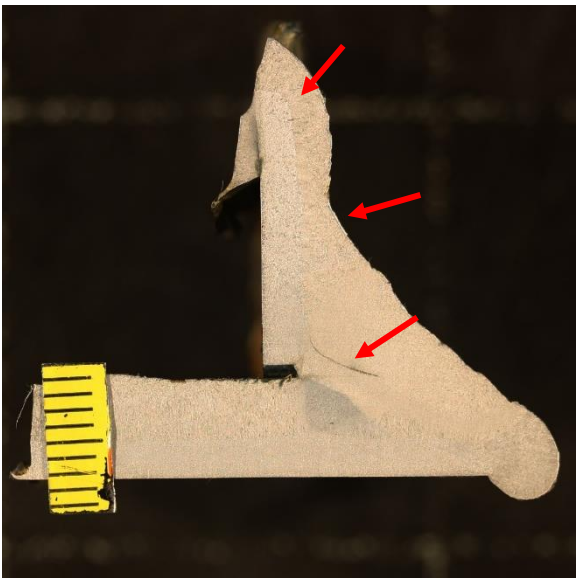
1a		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predviđena	- <sup>9</sup>
	Stvarna	-
<b>Uočeno</b>	- Naljepljivanje - Razlijevanje taline (nepravilan oblik zavara)	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	-	-

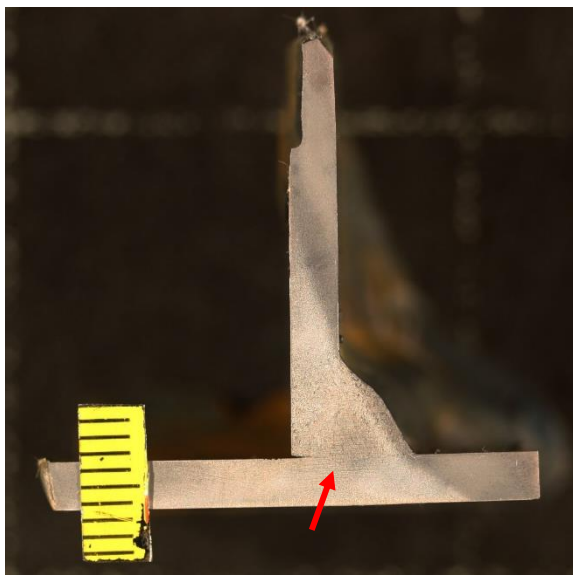
1b		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predviđena	-
	Stvarna	-
<b>Uočeno</b>	- Naljepljivanje - Razlijevanje taline (nepravilan oblik zavara)	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	-	-


<sup>9</sup> Nije moguće odrediti polja označena s „-“

2		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predvidena	-
	Stvarna	-
<b>Uočeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Naljepljivanje</li> <li>- Razlijevanje taline</li> <li>- Indikacija na pukotinu</li> </ul>	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	-	-

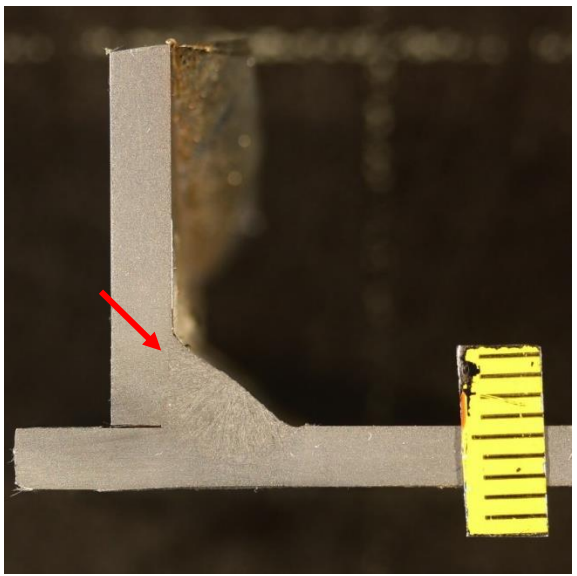


3		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predvidena	3,5 mm
	Stvarna	3,5 mm
<b>Uočeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Naljepljivanje</li> <li>- Nedovoljan provar</li> </ul>	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Nesimetričnost zavara (512)	<b>B</b>
	Visina zavara (5213)	<b>B</b>

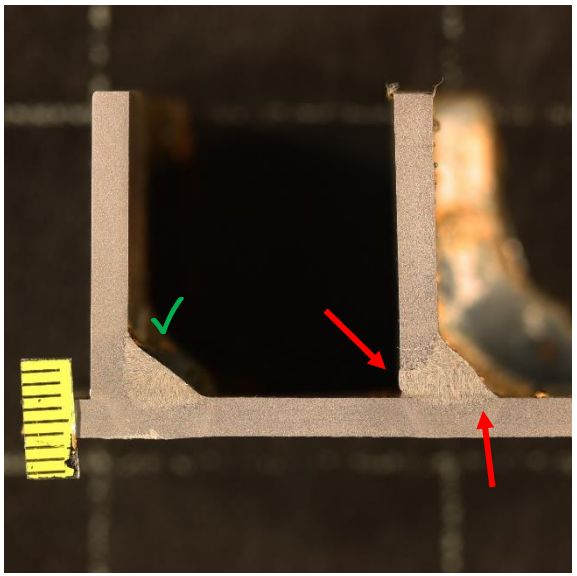




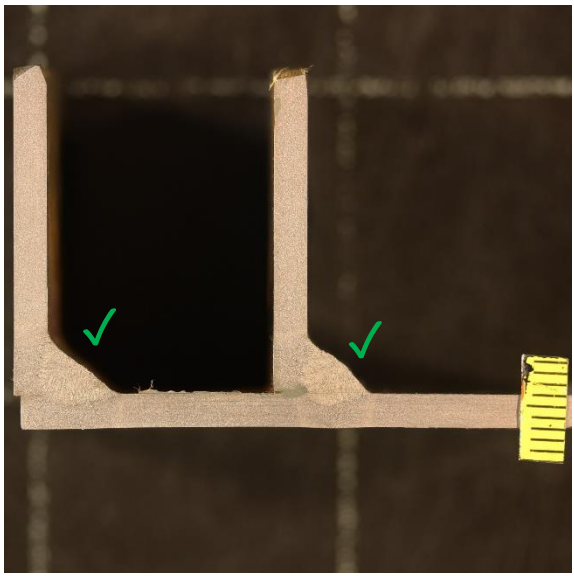
4		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predviđena	3,5 mm
	Stvarna	3,2 mm
<b>Uočeno</b>	- Naljepljivanje - Nedovoljan provar	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Nesimetričnost zavara (512)	<b>B</b>
	Visina zavara (5213)	<b>D<sup>11</sup></b>



5a		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predviđena	3,5 mm
	Stvarna	3,5 mm
<b>Uočeno</b>	- Naljepljivanje jedne str. - Potpuni provar druge str. - Lijeve zavar pravilno izveden	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Nesimetričnost zavara (512)	<b>B</b>
	Visina zavara (5213)	<b>B</b>



5b		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Predviđena	3,5 mm
	Stvarna	3,5 mm
<b>Uočeno</b>	- Pravilan izgled oba zavara	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Nesimetričnost zavara (512)	<b>B</b>
	Visina zavara (5213)	<b>B</b>



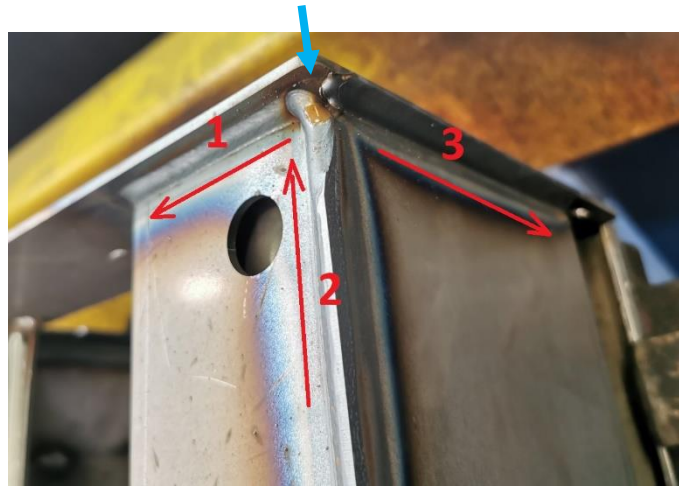
### 5.5. Analiza problema postojeće tehnologije zavarivanja

Analizom makroizbrusaka ustanovljeno je da dolazi do naljepljivanja dodatnog materijala na osnovni materijal i nedovoljnog provara. U većini analiziranih spojeva materijal zavara nije homogen te su vidljive granice metala zavarivanih limova i metala dodatnog materijala. Može se zaključiti da je naljepljivanje materijala jedan od glavnih razloga pojave propuštanja. U području nehomogeno pomiješanog materijala dolazi do pojave sustava (mikro) pukotina kojima radni medij putuje i prolazi na drugu stranu zavarenog spoja. Dodatnim opetovanim zagrijavanjem i hlađenjem strukture kotla i radnog medija u eksploataciji se može predvidjeti napredovanje ostalih pukotina te pojava propuštanja na drugim kritičnim pozicijama strukture kotla, kao i na mjestima koja nisu uzeta u razmatranje.

Naljepljivanje je nepravilnost nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju [12]. Najčešći uzroci naljepljivanja su nepravilna priprema spoja, korištenje neispravne kombinacije parametara i nepravilna tehnika rada. Primjerice korištenje nedovoljno jake struje ili prevelike brzine zavarivanja dovodi do naljepljivanja dodatnog materijala na osnovni. Razlog je što unesena toplina nije dostatna da rastali osnovni materijal u dovoljnoj mjeri. U skladu s time ne dolazi do dovoljnog strukturnog povezivanja dodatnog i osnovnog materijala. Naljepljivanje smanjuje čvrstoće zavarenog spoja i po geometriji je slično pukotinama. Teško ga je detektirati i u pravilu nije dopušteno. Razlog naljepljivanja može biti i kriva tehnika rada. Nagib pištolja značajno utječe na (prekomjerno) razlijevanje taline. Kao što je vidljivo na Slika 7 **Error! Reference source not found.** korištenje lijeve tehnike doprinosi razlijevanju taline. Prekomjerno razlijevanje taline i prevelik odmak taline od električnog luka dovodi do naljepljivanja. Uz krivu tehniku rada to se često događa i prilikom zavarivanja s velikim unosom topline ili kod prevelikog kuta pištolja za zavarivanje u odnosu na radni komad. [4][12]

Još jedan nedostatak postojeće tehnologije zavarivanja strukture kotla je ne-optimiziran redoslijed vođenja zavara u pogledu postizanja kvalitete zavarenih spojeva. Moguće je zaključiti kako je postojeći raspored vođenja zavara u direktnoj uzročno-posljedičnoj vezi s propuštanjem određenih (kritičnih) pozicija. Iz primjera sa Slika 30 vidljivo je da se postojećim redoslijedom zavarivanja pojedino područje strukture kotla (označeno plavom strelicom) zagrijava i hladi tri puta. Prvi put prilikom započinjanja prvog zavara, drugi put prilikom

završavanja drugog zavora te treći put prilikom započinjanja trećeg zavora. Višeputno zagrijavanje i hlađenje pojedinog mjesta, kao i završavanje, odnosno započinjanje zavora u istoj točki, treba izbjegavati jer isto dovodi do promjene strukture i mehaničkih svojstva materijala zavarenog spoja i osnovnog materijala odnosno pojavi nepravilnosti.



**Slika 30.** Raspored vođenja zavora (postojeća tehnologija zavarivanja)[24]

## **5.6. Optimizacija tehnologije zavarivanja**

Analizom postojeće tehnologije zavarivanja uočene su određene greške i nedostaci (naljepljivanje dodatnog materijala na osnovni materijal i ne-optimiziran raspored vođenja zavara) koji se manifestiraju u vidu propuštanja zavarenih spojeva na kritičnim mjestima. Kako bi se riješio problem propuštanja pristupilo se optimizaciji tehnologije zavarivanja strukture kotla i to na način da su promijenjeni i prilagođeni određeni parametri zavarivanja, a potom je proveden niz probnih zavarivanja tijekom kojih su se još dodatno prilagođavali parametri dok se nije dobio zavar željenog izgleda i kvalitete. Cijeli postupak je proveden na robotskoj stanici u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu uz pomoć i savjete prof. dr. sc. Ivice Garašića te asistentica Andreje Zaninović, mag. ing. mech. i dr. sc. Maje Jurice kao i djelatnika Laboratorija za zavarivanje.

### **5.6.1. Promjena brzine zavarivanja**

Uz primarni cilj optimizacije postupka zavarivanja u pogledu kvalitete i sprečavanju propuštanja, odnosno naljepljivanja, sekundarni cilj je bio povećanje brzine zavarivanja, odnosno povećanje produktivnosti zavarivanja. Brzina zavarivanja povećana je s 50 cm/min i 60 cm/min na 80 cm/min. Povećanje prosječne brzine zavarivanja za ~45 % pridonosi smanjenju ukupnog vremena potrebnog za zavarivanje cijelog kotla i povećanju sveukupne produktivnosti i ekonomičnosti jednog od aspekta proizvodnje. Povećanjem brzine zavarivanja dobiva se uži zavar manje penetracije (Slika 5), a kako bi se to kompenziralo je bilo nužno promijeniti druge parametre poput jakosti struje kako bi količina unesene topline i depozit dodatnog materijala ostali okvirno jednaki ili veći.

### **5.6.2. Promjena debljine žice**

U postojećoj tehnologiji zavarivanja se za zavarivanje koristio dodatni materijal - žica debljine (promjera) 1,2 mm. Debljina žice smanjena je s 1,2 mm na 1,0 mm (smanjenje od 17 %). Svojstva novoizabrane žice prikazana su u Tablica 8. Smanjenjem debljine žice se (ista) struja zavarivanja provodi kroz manji poprečni presjek žice u odnosu na dosadašnji postupak što

dovodi do koncentriranijeg električnog luka veće penetracije te manjeg depozita materijala u skladu sa Slika 4.

**Tablica 8.** Mehanička svojstva korištene žice

Mehanička svojstva dodatnog materijala - žice				
Oznaka	Opis	<i>R<sub>m</sub></i> <i>Vlačna čvrstoća</i>	<i>R<sub>p 0,2</sub></i> <i>Konv. granica razvlačenja</i>	Norma
CastoMAG 45202	Žica za MAG zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika.	≥ 500 N/mm <sup>2</sup>	≥ 385 N/mm <sup>2</sup>	EN ISO 14341:2020

### 5.6.3. Promjena načina prijenosa metala

Postojeća tehnologija zavarivanja koristi prijenos metala kratkim spojevima u području parametra struje 190-200 A. U tom području parametara dolazi do pojave prijelaznog luka što se očituje nestabilnošću luka i povećanim rasprskavanjem (koje se moglo uočiti na strukturi kotla). Optimizirana tehnologija koristi način prijenosa metala impulsnim lukom. Korištenjem impulsnog luka dobiva se veći depozit dodatnog materijala što je i potrebno s obzirom na povećanu brzinu zavarivanja. Uz veći depozit umjereno se povećava unos topline u odnosu na prijenos metala kratkim spojevima. Korištenjem impulsnog luka je postupak stabilniji i rasprskavanje je smanjeno.

### 5.6.4. Promjena zaštitnog plina

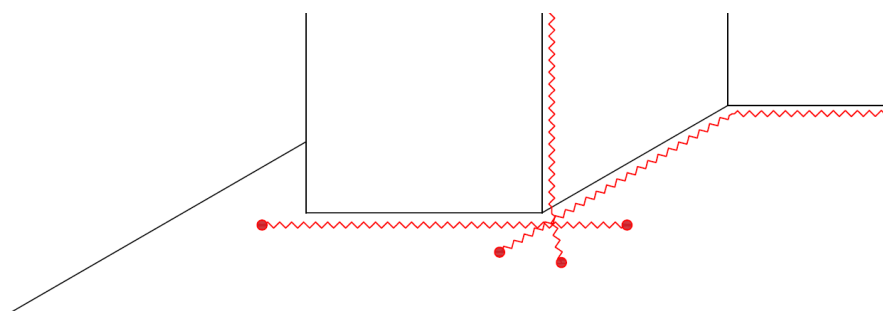
Postojeća tehnologija zavarivanja koristi zaštitni plin oznake *Ferroline C18* (oznaka M21 u skladu s ISO 14175) koji ima 82 % argona i 18 % ugljičnog dioksida. Umjesto navedene dvokomponentne plinske mješavine odlučeno je da će se koristiti trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6X1* (oznaka M24 u skladu s ISO 14175) koja sadrži 93 % argona, 6 % ugljičnog dioksida i 1 % kisika. Ova plinska mješavina povećava stabilnost luka, smanjuje potrebnu jakost struje i rasprskavanje, a uobičajena je upotreba na tankostijenim materijalima. [9][10]

### 5.6.5. Promjena rasporeda vođenja zavara

Umjesto postojećeg rasporeda vođenja zavara, u kojem očigledno dolazi do višestrukih preklapanja zavara i opetovanih zagrijavanja i hlađenja određenih područja konstrukcije kotla, proizvođaču se preporuča napraviti novi raspored. Pritom se treba voditi time da u istoj točki ne završava i ne započinje više zavara u skladu s primjerom na Slika 31 (koja prikazuje optimizirani postojeći raspored vođenja zavara sa Slika 30) i primjerom na Slici 32 na kojoj se vidi na koji način se preporuča započinjati i završavati zavare u situacijama u kojima je neizbježno preklapanje zavara. Uz to je potrebno, u skladu s mogućnostima, minimizirati broj zagrijavanja i hlađenja nekog područja.



**Slika 31.** Primjer ispravnog rasporeda vođenja zavara na postojećem primjeru[24]



**Slika 32.** Primjer mjesta započinjanja i završavanja zavara


### 5.7. Zavarivanje probnih uzoraka

U Laboratoriju za zavarivanje, na robotskoj stanici koja se sastoji od robotskog manipulatora OTC Daihen AXV6, uređaja za zavarivanje DP-400 te dodavača žice CM-7401 nakon promjene parametara opisane u prethodnom poglavlju zavareno je ukupno 15-20 probnih uzoraka. Nakon zavarivanja svakog probnog uzorka parametri su prilagođavani i iterirani sve dok se nisu postigli zavari zadovoljavajućeg izgleda i dimenzija. Uz ranije promijenjene parametre (debljina žica, vrsta plina, način prijenosa metala) postepeno su se mijenjali/prilagođavali i tražili optimalni parametri poput brzine zavarivanja, jakosti struje, korekcije napona, protok plina, duljina slobodnog kraja žice, nagiba pištolja i tehnika rada. Od ukupnog broja probnih uzoraka odabrano je pet najboljih, oni su označeni slovnim oznakama, fotodokumentirani, analizirani i prikazani u Tablica 9. Potom su izrađeni makroizbrusci, koji su također dokumentirani i analizirani.

Svi probni uzorci zavareni su u skladu s parametrima definiranim u poglavlju 5.6., odnosno za zavarivanje je korišten prijenos metala impulsnim lukom, trokomponentni plin *Ferroline C6X1* (M24) i prikladna žica debljine 1,0 mm.

**Tablica 9.** Probni uzorci zavareni optimiziranom tehnologijom


A	
Jakost struje	287 A
Napon	25,3 V
<i>Arc length tuning</i> <sup>10</sup>	15
Brzina zavarivanja	80 cm/min
Protok plina	15 l/min
Položaj zavarivanja	PA
Tehnika rada	Neutralna




<sup>10</sup> Postavka na uređaju za zavarivanje kojom se precizno regulira napon. *Input arc length tuning* (raspon vrijednosti od -100 do +100).

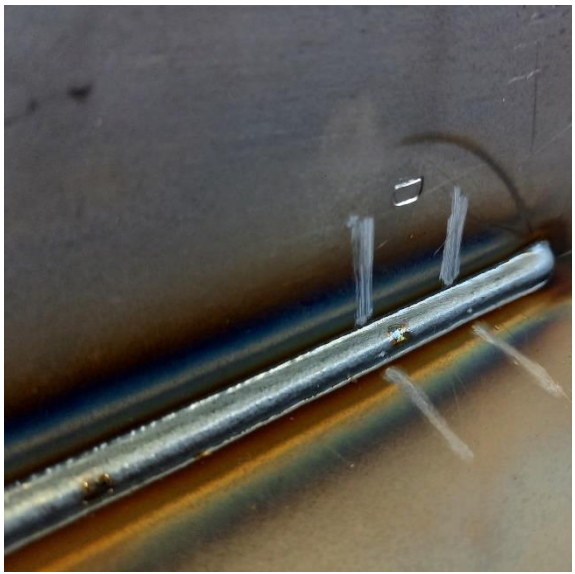



<b>B</b>	
Jakost struje	300 A
Napon	23,8 V
<i>Arc lenght tuning<sup>10</sup></i>	15
Brzina zavarivanja	85 cm/min
Protok plina	15 l/min
Položaj zavarivanja	PB
Tehnika rada	Neutralna



<b>C</b>	
Jakost struje	278 A
Napon	24,0 V
<i>Arc lenght tuning<sup>10</sup></i>	15
Brzina zavarivanja	80 cm/min
Protok plina	20 l/min
Položaj zavarivanja	PB
Tehnika rada	Desna (15°)



<b>D</b>		
Jakost struje	278 A	
Napon	24,7 V	
<i>Arc lenght tuning</i> <sup>10</sup>	25	
Brzina zavarivanja	80 cm/min	
Protok plina	20 l/min	
Položaj zavarivanja	PB	
Tehnika rada	Desna (15°)	

<b>E</b>		
Jakost struje	277 A	
Napon	25,5 V	
<i>Arc lenght tuning</i> <sup>10</sup>	28	
Brzina zavarivanja	80 cm/min	
Protok plina	20 l/min	
Položaj zavarivanja	PB	
Tehnika rada	Desna (15°)	

Nakon zavarivanja uzoraka, uzorak A je ispitan penetrantom (Slika 33). S obzirom da nije došlo do propuštanja navedenog uzorka zaključeno je da nema potrebe za ispitivanjem ostalih uzoraka.



**Slika 33.** Ispitivanje probnog uzorka A penetrantom

### 5.8. Analiza makroizbrusaka probnih uzoraka

Nakon zavarivanja probnih uzoraka i odabira pet najboljih, od istih su izrađeni makroizbrusci koji su označeni slovnim oznakama (A-E). Makroizbrusci su fotodokumentirani i analizirani, izmjerena je postignuta visina zavara te je određena razina kvalitete svakog u skladu s HRN EN ISO 5817:2014. Sve skupa je prikazano u Tablica 10.

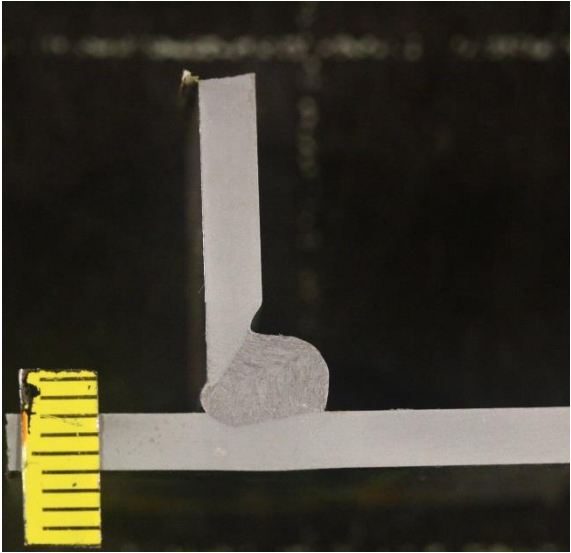
**Tablica 10.** Analiza makroizbrusaka probnih uzoraka

A		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Postignuta	3,1 mm
<b>Uočeno</b>	- Prisutne ugorine - Dovoljna penetracija	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Ugorine (5011)	C <sup>11</sup>

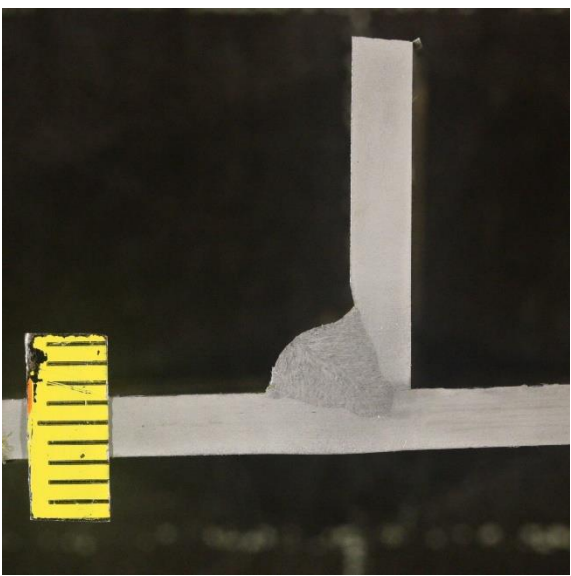
<sup>11</sup> Vrijedi samo za kratke nepravilnosti, odnosno:

- ako je duljina zavara  $\geq 100$  mm ukupna duljina nepravilnosti mora iznositi  $\leq 25$  mm
- ako je duljina zavara  $< 100$  mm ukupna duljina nepravilnosti mora iznositi  $\leq 25$  % duljine zavara

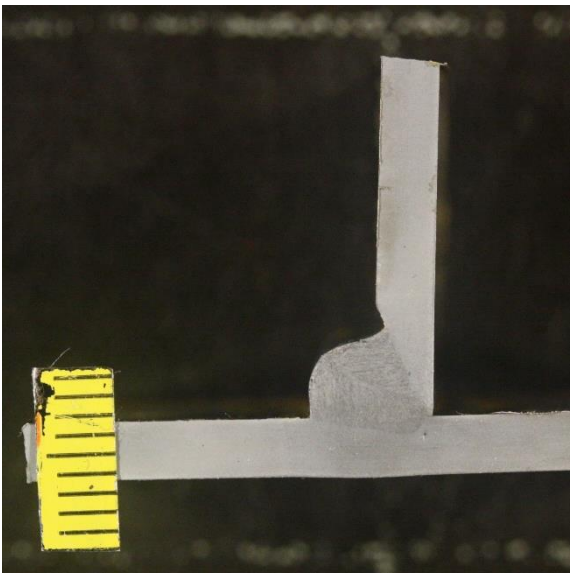
<b>B</b>		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Postignuta	2,5 mm
<b>Uočeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prisutna ugorina</li> <li>- Prekomjerna konveksnost</li> <li>- Potpuni provar</li> </ul>	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Ugorine (5011)	<b>D<sup>11</sup></b>



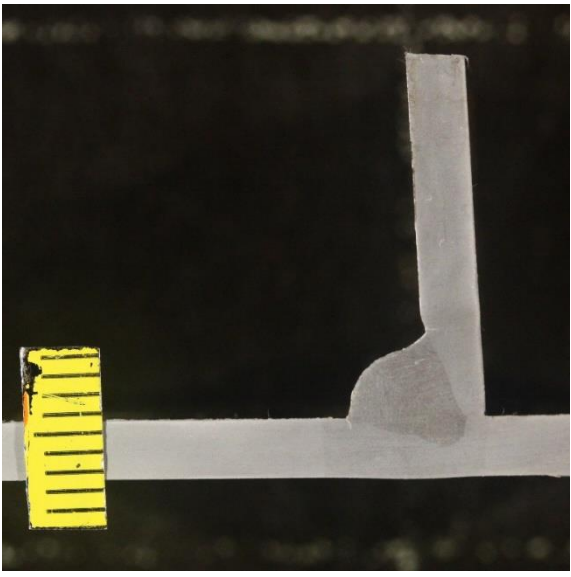
<b>C</b>		
<b>Visina zavara</b> <i>a</i>	Postignuta	3,0 mm
<b>Uočeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prisutna ugorina</li> <li>- Dovoljna penetracija</li> </ul>	
<b>Razina kvalitete</b> HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Ugorine (5011)	<b>C<sup>11</sup></b>



D		
Visina zavara <i>a</i>	Postignuta	2,5 mm
Uočeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prisutna ugorina</li> <li>- Dovoljna penetracija</li> <li>- Nesimetričnost zavara</li> <li>- Prekomjerna konveksnost</li> </ul>	
Razina kvalitete HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Ugorine (5011)	C <sup>11</sup>

E		
Visina zavara <i>a</i>	Postignuta	3 mm
Uočeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prisutna ugorina</li> <li>- Dovoljna penetracija</li> </ul>	
Razina kvalitete HRN EN ISO 5817	Kriterij (ISO 6520-1)	Razina kvalitete
	Ugorine (5011)	C <sup>11</sup>



Svi zavareni probni uzorci, neovisno o korištenim parametrima, imaju postignutu intenzivniju penetraciju u odnosu na postojeću tehnologiju zavarivanja zbog korištenja trokomponentnog plina *Ferroline C6X1* u kombinaciji s tanjim dodatnim materijalom debljine 1,0 mm. Zahvaljujući boljoj postignutoj penetraciji može se tolerirati manja postignuta visina zavara *a*.



### 5.9. Usporedba postojeće i optimizirane tehnologije zavarivanja

U Tablica 11 prikazana je usporedba parametara postojeće i optimizirane tehnologije zavarivanja, odnosno zavarenih probnih uzoraka. Iz tablice je vidljivo da je brzina zavarivanja u odnosu na postojeću tehnologiju zavarivanja povećana s 50 cm/min na 80 cm/min (odnosno za 60 %), a u skladu s time su povećane i jakost struje i unesena toplina (za ~33 %). Povećanje brzine zavarivanja značajno doprinosi produktivnosti proizvodnje, a uz to se, zbog korištenja trokomponentne plinske mješavine i tanje žice, postiže intenzivnija penetracija.

Intenzivnija penetracija, dobivena korištenjem optimizirane tehnologije, u znatnoj mjeri smanjuje vjerojatnost pojave naljepljivanja i gotovo eliminira mogućnost pojave greške propuštanja. Navedeno je u skladu provedenim ispitivanjem penetrantom uzorka A, tijekom kojeg nije došlo do propuštanja.

**Tablica 11.** Usporedba parametara zavarivanja postojeće i optimizirane tehnologije

Usporedba parametara zavarivanja						
Tehnologija/Parametar	Postojeća			Optimizirana		
Oznaka	-	-	-	A	C	E
Način prijenosa metala	Kratki spojevi			Impulsni luk		
Brzina zavarivanja [cm/min]	50	50	60	80	80	80
Jakost struje [A]	190	200	200	287	278	277
Napon [V]	18,3	16,4	18,5	25,3	24,0	25,5
Unesena toplina [kJ/mm]	0,334	0,315	0,296	0,436	0,400	0,424
Debljina žice [mm]	1,2			1,0		
Zaštitni plin	C18 (82 % Ar, 18 % CO <sub>2</sub> )			C6X1 (93 % Ar, 6 % CO <sub>2</sub> , 1 % O <sub>2</sub> )		
Protok z. plina [l/min]	-	-	-	15	20	20
Položaj zavarivanja	-	-	-	PA	PB	PB
Tehnika rada (N - neutralna, D – desna)	-	-	-	N	D	D

## 6. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja jedan je od najčešće upotrebljivanih postupaka zavarivanja zbog velike varijabilnosti i mogućnosti automatizacije te se često koristi za robotizirano zavarivanje koje odlikuju veća produktivnost, veća brzina zavarivanja i dosljednost zavara. Robotizirano zavarivanje donosi sa sobom izazove poput potrebe za užom tolerancijom dijelova, kompliciranijim zahtjevima na dizajn te detaljnijom pripremom prije zavarivanja. Tijekom robotiziranog zavarivanja proizvoda često dolazi do pojave nepravilnosti, a posebno kod kompleksnih geometrija/konstrukcija. U određenim fazama izrade eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada korištena je NDT metoda vizualnog pregleda, kao i metoda ispitivanja penetrantom.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je struktura kotla te je zaključeno da je naljepljivanje glavni uzrok propuštanja. Provedena je optimizacija tehnologije, odnosno odabrani su novi parametri zavarivanja s ciljem povećanja produktivnosti i smanjenja naljepljivanja tj. sprečavanja propuštanja. Umjesto postojeće žice debljine 1,2 mm odabrana je tanja žica debljine 1,0 mm, povećana je brzina zavarivanja, prijenos metala kratkim spojevima (prijelaznim lukom) zamijenjen je impulsnim lukom te je umjesto dvokomponentnog plina odabrana trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6X1*. Proizvođaču je demonstrirano na koji način se preporuča promijeniti postojeći redoslijed zavarivanja koji ima utjecaja na nepravilnosti koje se javljaju u zavarenim spojevima.

Analiza makroizbrusaka probnih uzoraka pokazala je kako dolazi do dovoljne penetracije i kako je naljepljivanje eliminirano. Svi zavareni probni uzorci imaju postignutu intenzivniju penetraciju u odnosu na postojeću tehnologiju zavarivanja zbog korištenja trokomponentnog plina i tanjeg dodatnog materijala. Intenzivnijom penetracijom i promjenom redoslijeda zavarivanja umanjuje se vjerojatnost pojave naljepljivanja tijekom zavarivanja strukture kotla, odnosno sprečava se propuštanje zavarenih spojeva. Također, zbog intenzivnije penetracije može se tolerirati manja postignuta visina zavara.



Parametri i zaključci iz ovog diplomskog rada mogu proizvođaču poslužiti kao smjernice za daljnji razvoj i prilagodbu dostupne tehnologije zavarivanja strukture kotla. Pokazano je na koji način je moguće spriječiti pojavu propuštanja kotla i pritom povećati brzinu zavarivanja za do čak 60 %. Ekstremno veliko povećanje brzine zavarivanja postignuto u ovom radu proizvođaču ostavlja dovoljno prostora za dodatno usavršavanje tehnologije povećane produktivnosti u odnosu na postojeću.

## 7. LITERATURA

- [1] Jenney, C.Y. (Ed.), O'Brien, A. (Ed.): *Welding handbook (9th edition) Volume 1, Welding Science and Technology*, American Welding Society, Miami, 2001.
- [2] Car, L.: *Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [3] Kralj, S., Andrić, Š.: *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1992.
- [4] Weman, K.: *Welding Process handbook (2nd edition)*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2011.
- [5] Struna: *Kondukcija*, Hrvatsko strukovno nazivlje, dostupno na:  
<http://struna.ihjj.hr/naziv/kondukcija/8150/> (Pristupljeno 29.05.2021.)
- [6] Garašić, I.: *Predavanja iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, ak. god. 2020./2021.
- [7] Garašić, I.: *Predavanja iz kolegija Postupci zavarivanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, ak. god. 2020./2021.
- [8] Sinković, M.: *MAG CBT zavarivanje s trokomponentnim plinskim mješavinama*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [9] Lincoln Electric: *Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection*, dostupno na:  
[https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf) (Pristupljeno 29.05.2021.)
- [10] Levačić, L.: *Trokomponentne plinske mješavine za MAG zavarivanje*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [11] O'Brien, A. (Ed.): *Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes*, American Welding Society, Miami, USA, 2004.
- [12] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M.: *Pogreške u zavarenim spojevima*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 1998.

- [13] Garašić, I.: *Bilješke s predavanja iz kolegija Zavarljivost materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, ak. god. 2018./2019.
- [14] Pires, N., Loureiro, A., Bolmsjö, G.: *Welding Robots Technology, Systems Issues and Applications*, Springer, New York, 2006.
- [15] Werman, K. (Ed.), Linden, G. (Ed.): *MIG welding guide*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2006.
- [16] Jurić, I., Garašić, I., Stojanović, I.: *Bilješke s predavanja iz kolegija Robotizirano zavarivanje i prevlačenje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, ak. god. 2020./2021.
- [17] Hellier, C.: *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [18] Markučić, D.: *Predavanja iz kolegija Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, ak. god. 2019./2020.
- [19] Struna: *Sljedivost, Ponovljivost*, Hrvatsko strukovno nazivlje, dostupno na: <http://struna.ihjj.hr> (Pristupljeno 29.05.2021.)
- [20] Web stranice Leksikografskog Zavoda Miroslav Krleža: *Oko*, Enciklopedija, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44922> (Pristupljeno 25.5.2021.)
- [21] Inertek: *Dye Penetrant Inspection (DPI)*, dostupno na: <https://www.intertek.com/non-destructive-testing/dye-penetrant-inspection/> (Pristupljeno 20.5.2021.)
- [22] Superior Joining Technologies: *NDT Methods Used in the Aerospace Industry*, dostupno na: <https://www.superiorjt.com/sjti-articles/ndt-methods-used-in-the-aerospace-industry> (Pristupljeno 20.5.2021.)
- [23] Salzgitter Flachstahl, *DD12*, Katalog proizvođača, Dostupno na: [https://www.salzgitterflachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte\\_produkte/eng/dd12.pdf](https://www.salzgitterflachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/dd12.pdf) (Pristupljeno 31.5.2021.)
- [24] Arhiva Laboratorija za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu





VENETA NASTRI  
CENTRO SERVIZI LAMIERE

Lavorazione e vendita di coils, lamiera, nastri e bande in acciaio laminato a caldo, nero e elettrolitico, laminato a freddo, elettrolitico, alluminio, zinco, allumini, inossidabile e protezione superficiale in PVC

Veneta Nastri S.p.A.  
Società Unipersonale  
Via Z. Biondini, 3 - Zona Industriale - 31038 SAN ZENO (TV) Italy  
Tel. +39 0422 8501193  
Fax +39 0422 8501193  
email: info.ven@venetanastri.it

Cap. Soc. Euro 5.160.000,00 I. V.  
Reg. Imprese TV 00471500294  
R.E.A. n. TV 121483 - 10 TV 048024  
C.F. e P.IVA: 01641040264

A02 TIPO DI CERTIFICATO : MECCANICHE+CHIMICHE  
A03 CERTIFICATO N°/DOCUMENT N°: 8653

DOCUMENT TYPE : INTERNAL MECHANICAL+CHEMICAL

Z02 Data: 07/04/21  
Pag. : 2

Documento composto da 2 pagine / Document included by 2 page

VENETA NASTRI SPA UNIPERSONALE  
Resp. Laboratorio - Fantinel P.I. Giorgio

GRUPPO  
**gabrielli**  
STEEL SERVICE NETWORK