

# Tehnološki proces zavarivanja i ispitivanje zavara kod zavarenih bešavnih cijevi

---

**Jančić, Deni**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:434836>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



DENI JANČIĆ

**TEHNOLOŠKI PROCES ZAVARIVANJA I ISPITIVANJE ZAVARA  
KOD ZAVARENIH BEŠAVNIH CIJEVI**

Završni rad

Pula, rujan 2024. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli

DENI JANČIĆ

**TEHNOLOŠKI PROCES ZAVARIVANJA I ISPITIVANJE ZAVARA  
KOD ZAVARENIH BEŠAVNIH CIJEVI**

Završni rad

**JMB: 0069057767, izvanredni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Tehnologija III**

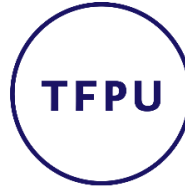
**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: 2.11 Strojarstvo**

**Znanstvena grana: 2.11.03 Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: Dario Bognolo, viši predavač**

Pula, rujan 2024. godine



Tehnički fakultet u Puli

Dario Bognolo, viši predavač  
(Ime i prezime nastavnika)

Tehnologija III  
(Predmet)

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**

**ZADATAK TEME ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupniku** Deni Jančiću

**MBS:** 0069057767

**Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za diplomski rad – tema diplomskog rada pod nazivom:**

**Tehnološki proces zavarivanja i ispitivanje zavara kod zavarenih bešavnih cijevi**

**Sadržaj zadatka:** Napisati osnovnu hipotezu, predmet i problem istraživanja te sukladno odabranoj hipotezi postaviti ciljeve istraživanja. Tema koja se obrađuje u ovom radu odnosi se na tehnološki proces zavarivanja bešavnih cijevi. Zatim obraditi ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Obraditi postupke zavarivanja i donijeti zaključak o optimalnom postupku zavarivanja.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

**Izvanredni, Strojarsvo**

**Datum:** lipanj, 2024.

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Deni Jančić, kandidat za prvostupnika Proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

---

Pula, rujan 2024. godine

## IZJAVA

o korištenju autorskog dijela

Ja, Deni Jančić, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom "Tehnološki proces zavarivanja i ispitivanje zavara kod zavarenih bešavnih cijevi" koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama. Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Deni Jančić

---

Pula, rujan 2024. godine

## **ZAHVALA**

Želim iskazati duboku zahvalnost mentoru Dariu Bognolu, višem predavaču na pomoći, stručnim savjetima te konstruktivnim kritikama bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć. Također se želim zahvaliti mojim kolegama sa fakulteta te kolegama.

Najveće zahvale želim izraziti mojoj obitelji i prijateljima, na njihovoj beskonačnoj podršci, ohrabrenju i strpljenju usprkos svim izazovima tijekom mog akademskog puta.

## SAŽETAK

U ovom radu razmatra se tehnološki proces zavarivanja i ispitivanja zavara na bešavnim cijevima. Glavni cilj je usporediti različite metode zavarivanja i ispitivanja zavara koje su dostupne na tržištu, s naglaskom na postizanje optimalne kvalitete zavarenih spojeva. Hipoteza rada je da različite metode zavarivanja omogućuju različite razine kvalitete zavarenih spojeva bešavnih cijevi. Ovaj rad se fokusira na metode zavarivanja bešavnih cijevi i njihove karakteristike, kao i na kvalitetu zavarenih spojeva. Ciljevi istraživanja uključuju prikazivanje ključnih informacija o procesu zavarivanja, detaljno objašnjenje posebnosti bešavnih cijevi, i analiziranje postupaka zavarivanja i ispitivanja zavara. Metodologija rada obuhvaća korištenje različitih znanstvenih metoda, uključujući povijesnu metodu, analizu i sintezu, induktivnu i deduktivnu metodu, te komparativnu metodu. Kroz literaturu i praktične primjere prikupljena su saznanja koja su analizirana i predstavljena u radu. Struktura rada obuhvaća pregled proizvodnje bešavnih cijevi, tehnologija i metoda zavarivanja, te tehnologija i metoda ispitivanja zavara. Rad će pružiti detaljan prikaz tehnologije ispitivanja zavara na bešavnim cijevima, što će omogućiti bolje razumijevanje kvalitete i učinkovitosti različitih metoda zavarivanja.

**Ključne riječi:** bešavna cijev, zavarivanje materijala, ispitivanje materijala



## **ABSTRACT**

In this paper, the technological process of welding and testing welds on seamless pipes is considered. The main objective is to compare the various welding and weld testing methods available on the market, with an emphasis on achieving optimal quality of welded joints. The hypothesis of the work is that different welding methods enable different quality levels of welded joints of seamless pipes. This paper focuses on welding methods of seamless pipes and their characteristics, as well as the quality of welded joints. Research objectives include presenting key information about the welding process, detailing the specifics of seamless pipes, and analyzing welding procedures and weld testing. The methodology of the work includes the use of various scientific methods, including the historical method, analysis and synthesis, inductive and deductive methods, and the comparative method. Knowledge was gathered through literature and practical examples, which were analyzed and presented in the paper. The structure of the work includes an overview of the production of seamless pipes, welding technologies and methods, and welding testing technologies and methods. The paper will provide a detailed description of the technology of welding tests on seamless pipes, which will allow a better understanding of the quality and efficiency of different welding methods.

**Key words:** seamless pipe, material welding, material testing

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 1.1. Hipoteza .....  | 1  |
| 1.2. Predmet istraživanja.....                                       | 1  |
| 1.3. Problem istraživanja.....                                       | 1  |
| 1.4. Ciljevi istraživanja .....                                      | 2  |
| 1.5. Metodologija rada .....   | 3  |
| 1.6. Struktura rada .....  | 3  |
| 2. TEORIJSKE ODREDNICE PROCESA ZAVARIVANJA .....                     | 4  |
| 2.1. Termokemijski procesi .....                                     | 4  |
| 2.2. Elektrootporno zavarivanje.....                                 | 5  |
| 3. KARAKTERISTIKE BEŠAVNIH CIJEVI .....                              | 7  |
| 3.1. Pojmovno određenje.....   | 7  |
| 3.2. Proizvodnja .....   | 10 |
| 3.3. Materijali.....   | 11 |
| 3.4. Postupci zavarivanja .....                                      | 12 |
| 3.4.1. REL postupak zavarivanja .....                                | 12 |
| 3.4.2. MIG/MAG postupak zavarivanja .....                            | 14 |
| 3.4.3. TIG postupak zavarivanja .....                                | 17 |
| 4. MEHANIČKA SVOJSTVA ZAVARENIH SPJEVA I MIKROSTRUKTURA ZAVARA ..... | 20 |
| 4.1. Metode ispitivanja bez razaranja.....                           | 20 |
| 4.2. Metode ispitivanja s razaranjem.....                            | 22 |
| 4.2.1. Mjerenje vlačne čvrstoće .....                                | 23 |
| 4.2.2. Ispitivanje savijanjem .....                                  | 25 |
| 4.2.3. Ispitivanje tvrdoće .....                                     | 26 |
| 4.2.4. Mjerenje udarne žilavosti.....                                | 27 |
| 4.2.5. Metalografsko ispitivanje.....                                | 29 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3. Mikrostruktura zavarenog spoja.....         | 29 |
| 5. TEHNOLOGIJA ISPITIVANJA BEŠAVNIH CIJEVI ..... | 31 |
| 6. ZAKLJUČAK.....                                | 36 |
| POPIS LITERATURE .....                           | 37 |
| POPIS SLIKA.....                                 | 38 |

## 1. UVOD

### 1.1. Hipoteza

Hipoteza rada je da unaprijeđeni postupci zavarivanja i kontrole omogućuju postizanje optimalne kvalitete zavarenog spoja bešavnih cijevi, ovisno o odabranoj metodi zavarivanja. Rad se temelji na prikazu tehnološkog procesa zavarivanja i ispitivanja zavara na bešavnim cijevima te usporedbi metoda zavarivanja i ispitivanja zavara prisutnih na tržištu.

### 1.2. Predmet istraživanja

Zavarivanje je proizvodni proces koji spaja materijale, obično metale ili termoplastiku, korištenjem visoke topline za topljenje dijelova i dopuštanje im da se ohlade, uzrokujući fuziju. Zavarivanje se razlikuje od tehnika nižih temperatura kao što su lemljenje i lemljenje, koje ne tale osnovni metal (osnovni metal).

Bešavne cijevi zbog svoje široke primjene, zahtijevaju ponekad spajanje zavarima i kao takve u tom postupku imaju određenu kvalitetu kao finalni proizvod.

Predmet ovoga rada je predočiti na koje načine i kojim postupcima se provodi zavarivanje bešavnih cijevi, koja je njihova karakteristika te koje su karakteristike takvih zavarenih spojeva.

### 1.3. Problem istraživanja

Problemi u zavarivanju bešavnih cijevi, s obzirom na ciljeve rada i stanje na tržištu, mogu se identificirati kao:

1. **Kvaliteta zavarivanja** – Postizanje optimalne kvalitete zavarenih spojeva može biti izazovno zbog različitih metoda zavarivanja koje nude različite rezultate. Nedostatak standardiziranih procedura može dovesti do varijacija u kvaliteti zavara, što utječe na pouzdanost i dugovječnost bešavnih cijevi u primjeni.
2. **Kompleksnost postupaka zavarivanja** – Različite metode zavarivanja, poput REL, MIG/MAG i TIG, imaju specifične zahtjeve i izazove. Odabir najprikladnije metode za određenu primjenu može biti otežan zbog složenosti procesa i potrebne ekspertize, što može dovesti do povećanih troškova i dužih vremena proizvodnje.

3. **Ispitivanje i kontrola kvalitete** – Metode ispitivanja, bilo bez razaranja ili s razaranjem, mogu biti složene i skupe. Osiguranje točnosti i pouzdanosti ispitivanja zahtijeva sofisticiranu opremu i stručnost, što može biti izazovno, posebno u sredinama s ograničenim resursima ili nedostatkom kvalificiranog osoblja.
4. **Materijali i proizvodni procesi** – Različiti materijali i proizvodni procesi mogu utjecati na karakteristike bešavnih cijevi i njihovih zavarenih spojeva. Problemi mogu nastati zbog neusklađenosti između materijala cijevi i zavarivačkog postupka, što može dovesti do smanjenja mehaničkih svojstava i trajnosti proizvoda.
5. **Stanje na tržištu** – Promjene u tržištu, kao što su nova regulativa, konkurencija i zahtjevi za većom učinkovitošću, mogu utjecati na izbor metoda zavarivanja i ispitivanja. Ove promjene mogu stvoriti dodatne izazove u održavanju visokih standarda kvalitete i konkurentnosti proizvoda.

#### 1.4. Ciljevi istraživanja

Ciljevi istraživanja su:

- **Analizirati tehnološki proces zavarivanja bešavnih cijevi** – Ovo uključuje pregled različitih metoda zavarivanja i ispitivanja zavara kako bi se identificirale najbolje prakse i tehnologije za postizanje optimalne kvalitete zavarenih spojeva.
- **Istražiti karakteristike bešavnih cijevi** – Ovo obuhvaća razumijevanje pojmovnog određenja, proizvodnje, materijala i specifičnih postupaka zavarivanja koji se primjenjuju na bešavne cijevi.
- **Evaluirati mehanička svojstva i mikrostrukturu zavarenih spojeva** – Cilj je analizirati metode ispitivanja, kako one bez razaranja, tako i one s razaranjem, uključujući mjerenje vlačne čvrstoće, ispitivanje savijanjem, ispitivanje tvrdoće, mjerenje udarne žilavosti i metalografsko ispitivanje, te istražiti mikrostrukturu zavarenog spoja.
- **Prezentirati tehnologiju ispitivanja bešavnih cijevi** – Ovo uključuje detaljno razmatranje tehnologije i metoda ispitivanja bešavnih cijevi kako bi se osigurala kvaliteta i performanse zavarenih spojeva.

### **1.5. Metodologija rada**

Kroz literaturu i kroz praktične primjere prikupljena su saznanja, koja se izlažu u radom te se na kraju donose zaključci. Pri izradi ovog rada korištene su sljedeće znanstvene metode: povijesna metoda, metoda analize i sinteze, induktivna i deduktivna metoda, metoda klasifikacije, komparativna metoda, metoda kompilacije, metoda deskripcije, metoda dokazivanja.. Prilikom obrade literature korištene su povijesna metoda, metoda analize i sinteze, induktivna i deduktivna metoda, metoda klasifikacije te metoda komparacije. Citati i grafički prikazi preuzeti iz korištene literature prikazani su metodom kompilacije.

### **1.6. Struktura rada**

Rad započinje uvodom koji uključuje hipotezu, predmet istraživanja, ciljeve istraživanja, metodologiju rada i strukturu rada. Slijedi pregled teorijskih odrednica procesa zavarivanja, uključujući termokemijske procese i elektrootporno zavarivanje. Treće poglavlje fokusira se na karakteristike bešavnih cijevi, obuhvaćajući pojmovno određenje, proizvodnju, materijale i postupke zavarivanja, pri čemu su detaljno razrađeni REL, MIG/MAG i TIG postupci. Četvrto poglavlje analizira mehanička svojstva zavarenih spojeva i mikrostrukturu zavara, pokrivajući metode ispitivanja bez razaranja i metode ispitivanja s razaranjem, uključujući mjerenje vlačne čvrstoće, ispitivanje savijanjem, ispitivanje tvrdoće, mjerenje udarne žilavosti i metalografsko ispitivanje. Na kraju, rad se bavi tehnologijom ispitivanja bešavnih cijevi.

## 2. TEORIJSKE ODREDNICE PROCESA ZAVARIVANJA

Zavarivanje je proizvodni proces pri kojem se dva ili više dijelova spajaju uz pomoć topline, pritiska ili oba, tvoreći spoj dok se dijelovi hlade. Ovaj postupak se obično koristi na metalima i termoplastičnim materijalima. Završeni spoj naziva se zavareni spoj.

Zavar se definira kao spajanje metala proizvedeno zagrijavanjem na odgovarajuću temperaturu, sa ili bez primjene pritiska, te sa ili bez upotrebe dodatnog materijala.

Kod zavarivanja taljenjem, izvor topline stvara dovoljno topline za stvaranje i održavanje bazena rastaljenog metala potrebne veličine. Toplina se može dobiti električnom energijom ili plinskim plamenom. Električno otporno zavarivanje može se smatrati zavarivanjem taljenjem jer se stvara rastaljeni metal. Postupci čvrste faze proizvode zavare bez taljenja osnovnog materijala i bez dodavanja dodatnog metala. Tlak se uvijek koristi, a toplina se općenito osigurava.

Električni luk koji se koristi u zavarivanju predstavlja pražnjenje visoke struje, niskog napona, obično u rasponu od 10 do 2000 ampera na 10 do 50 volti. Stupac luka je složen, ali se općenito sastoji od katode koja emitira elektrone, plinske plazme za provođenje struje i anodnog područja koje postaje razmjerno toplije od katode zbog bombardiranja elektronima. Obično se koristi istosmjerni (DC) luk, iako se mogu koristiti i izmjenični (AC) lukovi.

Ukupni unos energije u svim postupcima zavarivanja premašuje onaj koji je potreban za stvaranje spoja, jer se ne može učinkovito iskoristiti sva proizvedena toplina. Učinkovitost varira od 60 do 90 posto, ovisno o procesu; neki posebni procesi uvelike odstupaju od ove brojke. Toplina se gubi provođenjem kroz osnovni metal i zračenjem u okoliš.

Većina metala, kada se zagrije, reagira s atmosferom ili drugim metalima u blizini. Ove reakcije mogu biti izuzetno štetne za svojstva zavarenog spoja. Na primjer, većina metala brzo oksidira kada se rastali. Sloj oksida može spriječiti pravilno spajanje metala. Kapljice rastaljenog metala obložene oksidom ostaju zarobljene u zavaru i čine spoj krhkim. Neki vrijedni materijali dodani radi specifičnih svojstava reagiraju tako brzo na izlaganje zraku da taloženi metal nema isti sastav kao u početku. Ovi problemi doveli su do upotrebe strujanja i inertnih atmosfera.

### 2.1. Termokemijski procesi

Termokemijski proces je plinsko zavarivanje. Nekad je bio rangiran kao jednak po važnosti postupcima elektrolučnog zavarivanja. Plinsko zavarivanje je proces taljenja s

toplinom koja se dobiva izgaranjem acetilena u kisiku kako bi se dobio intenzivan, strogo kontrolirani plamen. Metal se dodaje spoju u obliku hladne žice za punjenje. Općenito je poželjan neutralni ili redukcijski plamen kako bi se spriječila oksidacija osnovnih metala. Vještom izradom mogu se proizvesti vrlo dobri zavari, ali brzine zavarivanja su vrlo niske. Topitelji pomažu u sprječavanju kontaminacije spoja oksidima.

Drugi termokemijski proces je aluminotermno (termitno) spajanje. Uspješno se koristi i za željezne i za obojene metale, ali se češće koristi za prve. Mješavina fino usitnjenog aluminijskog oksida i željeznog oksida se zapali kako bi se proizveo pregrijani tekući metal na oko 2800 °C (5000 °F). Reakcija je dovršena za 30 sekundi do 2 minute bez obzira na veličinu naboja. Postupak je prikladan za spajanje dijelova s velikim, kompaktnim poprečnim presjecima, kao što su pravokutnici i okrugli. Za zadržavanje tekućeg metala koristi se kalup.

## 2.2. Elektrootporno zavarivanje

Točkasto, šavno i projekcijsko zavarivanje su postupci otpornog zavarivanja u kojima se potrebna toplina za spajanje stvara na sučelju pomoću električnog otpora spoja. Varovi se izrađuju u relativno kratkom vremenu (obično 0,2 sekunde) korištenjem niskonaponskog izvora struje velike struje sa silom koja se primjenjuje na spoj kroz dvije elektrode, po jednu sa svake strane. Točkasti zavari se izvode u pravilnim razmacima na limu koji ima preklop. Čvrstoća spoja ovisi o broju i veličini zavara. Zavarivanje šava je kontinuirani proces u kojem se električna struja sukcesivno pulsira u spoj kako bi se formirao niz preklapajućih točaka ili kontinuirani šav. Ovaj se postupak koristi za zavarivanje spremnika ili konstrukcija gdje točkasto zavarivanje nije dovoljno. Izbočeni zavar nastaje kada je jedan od dijelova koji se zavaruju u otpornom stroju udubljen ili pritisnut kako bi se formirala izbočina koja se rastali tijekom ciklusa zavarivanja. Proces omogućuje zavarivanje više unaprijed određenih točaka u isto vrijeme. Svi ovi procesi omogućavaju vrlo visoke stope proizvodnje uz kontinuiranu kontrolu kvalitete. Najsuremenija oprema za otporno zavarivanje uključuje kompletne sustave povratne sprege za samoispravljanje svakog zavara koji ne zadovoljava željene specifikacije.

Flash zavarivanje je postupak elektrootpornog zavarivanja gdje se dijelovi koji se spajaju stežu, krajevi se polako spajaju i zatim razvlače kako bi izazvali luk ili bljesak.



Treperenje ili stvaranje luka se nastavlja sve dok se cijelo područje spoja ne zagrije; dijelovi se zatim sabijaju zajedno i održava pritisak dok se spoj ne formira i ohladi.

Za proizvodnju cijevi koristi se otporno zavarivanje niske i visoke frekvencije. Uzdužni spoj u cijevi izrađen je od metala stisnutog u obliku s rubovima koji se naslanjaju. Toplina zavarivanja ovisi o struji koja prolazi kroz proizvod i brzini kojom cijev prolazi kroz valjke. U ovom procesu moguće su brzine zavarivanja od 60 metara (200 stopa) u minuti. Zavarivanje elektronskim snopom

Kod zavarivanja elektronskim snopom izradak je bombardiran gustom strujom elektrona velike brzine. Energija tih elektrona pretvara se u toplinu pri udaru. Uključen je uređaj za fokusiranje snopa, a obradak se obično stavlja u vakuumsku komoru kako bi se omogućilo nesmetano putovanje elektrona. Zagrijavanje je toliko intenzivno da zraka gotovo trenutačno isparava rupu kroz spoj. Iznimno uski varovi s dubokim prodiranjem mogu se proizvesti korištenjem vrlo visokih napona—do 150 kilovolti. Radni komadi se točno pozicioniraju pomoću uređaja za automatsko pomicanje; na primjer, zavar u materijalu debljine 13 mm (0,5 inča) bio bi širok samo 1 mm (0,04 inča). Uobičajene brzine zavarivanja su 125 do 250 cm (50 do 100 inča) u minuti.

### 3. KARAKTERISTIKE BEŠAVNIH CIJEVI

#### 3.1. Pojmovno određenje

Tehnološki proces proizvodnje bešavnih cijevi se odvija u valjaonicama i započinje u tvorničkoj procesnoj peći gdje se rastopljeni metal, mješavina željeza i koksa za dobivanje čelika, oblikuje i hladi u primarni poluproizvod ili tkz. metalne ingote.

Ingoti nastavljaju kretanje po procesnoj liniji i prolaze kroz valjke za oblikovanje pod velikim pritiskom, tada nastaju veliki cilindri. Cilindri potom prolaze dugi niz valjaka za oblikovanje i produljivanje koji djeluju silama pod velikim pritiskom kako bi se cilindri izdužili i poprimili oblik cijevi. Postupak se izvodi pomoću kalibriranih valjaka i trna.

Razmak između valjaka određuje vanjski promjer cijevi, a promjer trna unutarnji. Kada cijevi poprime svoj konačni oblik, prolaze kroz valjke za obradu koji bruse i poliraju plašt cijevi potom dolaze do stroja za rezanje koji ih odmjerava i reže na standardnu duljinu.

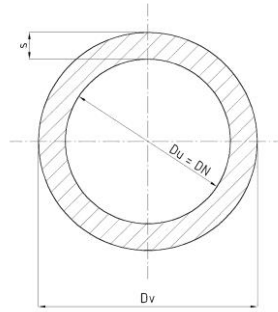
Nakon izlaska iz procesa, cijevi se hlade i šalju na kontrolu kvalitete, najčešće radiografsko ispitivanje, kojim se utvrđuje je li metalografska struktura cijevi ispravna. Nakon kontrole, cijevi su spremne za otpremu. Za cijevi je također bitna namjena tj. koje vrste medija će kroz cijev protjecati.



Sl.1 Bešavne cijevi, Izvor <https://www.weylan.hr/proizvodi/cijevi> (26.08.24.)

Osnovna karakteristika za standardizaciju cijevi je nazivni promjer. To je poprečni presjek cijevi i cijevnih elemenata označen sa DN. Čelične bešavne cijevi proizvode se zbog različitih uvjeta eksploatacije u više dimenzija nazivnog promjera i debljine stijenki. Vanjski promjer je konstantan, jer je standardiziran otvorom alata kojim se cijev izrađuje u valjaonici,

a unutrašnji promjer je varijabilan prema standardima debljine cijevi.



Sl.2. Poprečni presjek cijevi, Izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Cijev> (26.08.2024.)

Skica osnovnih dimenzija cijevi:  $DN$  - nazivni promjer cijevi,  $Du$  - unutarnji promjer cijevi,  $Dv$  - vanjski promjer cijevi,  $s$  - debljina stijenke cijevi.

Bešavne cijevi mogu izdržati visoke pritiske, pa se široko koriste u visokotlačnim aplikacijama, uključujući rafinerije, hidrauličke cilindre, industriju ugljikovodika i infrastrukturu nafte i plina.

U usporedbi s drugim vrstama cjevovoda, bešavne cijevi ne zahtijevaju nikakvo zavarivanje ili spajanje i jednostavno su oblikovane od čvrstih okruglih gredica, što pridonosi njihovoj čvrstoći i drugim karakteristikama uključujući otpornost na koroziju. Prema ASME-u, ove cijevi također su učinkovitije u podnošenju mehaničkih naprezanja i imaju viši radni tlak od zavarenih cijevi koje su poznate kao bešavne cijevi.

Steel Pipe Dimensions Chart ANSI B36.10 & 36.19

| Nominal Pipe Size | Outside Diameter (mm) | Nominal Wall Thickness Schedule |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|--|
|                   |                       | SCH 5s                          | SCH 8s | SCH 10 | SCH 20 | SCH 30 | SCH 40s | SCH 40 | SCH 60 | SCH 80s | SCH 80 | SCH 100 | SCH 120 | SCH 140 | SCH 160 | SCH 180 |       |       |  |
| 1/8               | 6                     | 10.3                            |        | 1.24   |        |        |         | 1.73   | 1.73   | 1.73    |        | 2.41    | 2.41    | 2.41    |         |         |       |       |  |
| 1/4               | 8                     | 13.7                            |        | 1.65   |        |        |         | 2.24   | 2.24   | 2.24    |        | 3.02    | 3.02    | 3.02    |         |         |       |       |  |
| 3/8               | 10                    | 17.1                            |        | 1.65   |        |        |         | 2.31   | 2.31   | 2.31    |        | 3.20    | 3.20    | 3.20    |         |         |       |       |  |
| 1/2               | 15                    | 21.3                            | 1.65   | 2.11   |        |        |         | 2.77   | 2.77   | 2.77    |        | 3.73    | 3.73    | 3.73    |         |         | 4.78  | 7.47  |  |
| 3/4               | 20                    | 26.7                            | 1.65   | 2.11   |        |        |         | 2.87   | 2.87   | 2.87    |        | 3.91    | 3.91    | 3.91    |         |         | 5.56  | 7.82  |  |
| 1                 | 25                    | 33.4                            | 1.65   | 2.77   |        |        |         | 3.38   | 3.38   | 3.38    |        | 4.55    | 4.55    | 4.55    |         |         | 6.35  | 9.09  |  |
| 1 1/4             | 32                    | 42.2                            | 1.65   | 2.77   |        |        |         | 3.56   | 3.56   | 3.56    |        | 4.85    | 4.85    | 4.85    |         |         | 6.35  | 9.70  |  |
| 1 1/2             | 40                    | 48.3                            | 1.65   | 2.77   |        |        |         | 3.68   | 3.68   | 3.68    |        | 5.08    | 5.08    | 5.08    |         |         | 7.14  | 10.15 |  |
| 2                 | 50                    | 60.3                            | 1.65   | 2.77   |        |        |         | 3.91   | 3.91   | 3.91    |        | 5.54    | 5.54    | 5.54    |         |         | 8.74  | 11.07 |  |
| 2 1/2             | 65                    | 73                              | 2.11   | 3.05   |        |        |         | 5.16   | 5.16   | 5.16    |        | 7.01    | 7.01    | 7.01    |         |         | 9.53  | 14.02 |  |
| 3                 | 80                    | 88.9                            | 2.11   | 3.05   |        |        |         | 5.49   | 5.49   | 5.49    |        | 7.62    | 7.62    | 7.62    |         |         | 11.13 | 15.24 |  |
| 3 1/2             | 90                    | 101.6                           | 2.11   | 3.05   |        |        |         | 5.74   | 5.74   | 5.74    |        | 8.08    | 8.08    | 8.08    |         |         |       |       |  |
| 4                 | 100                   | 114.3                           | 2.11   | 3.05   |        |        |         | 6.02   | 6.02   | 6.02    |        | 8.56    | 8.56    | 8.56    | 11.13   |         | 13.49 | 17.12 |  |
| 5                 | 125                   | 141.3                           | 2.77   | 3.40   |        |        |         | 6.55   | 6.55   | 6.55    |        | 9.53    | 9.53    | 9.53    | 12.70   |         | 15.88 | 19.05 |  |
| 6                 | 150                   | 168.3                           | 2.77   | 3.40   |        |        |         | 7.11   | 7.11   | 7.11    |        | 10.97   | 10.97   | 10.97   | 14.27   |         | 18.26 | 21.95 |  |
| 8                 | 200                   | 219.1                           | 2.77   | 3.76   | 6.35   | 7.04   | 8.18    | 8.18   | 8.18   | 10.31   | 12.70  | 12.70   | 12.70   | 15.09   | 18.26   | 20.62   | 23.01 | 22.23 |  |
| 10                | 250                   | 273.1                           | 3.40   | 4.19   | 6.35   | 7.80   | 9.27    | 9.27   | 9.27   | 12.70   | 12.70  | 12.70   | 15.09   | 18.26   | 21.44   | 25.40   | 28.58 | 25.40 |  |
| 12                | 300                   | 323.9                           | 3.96   | 4.57   | 6.35   | 8.38   | 9.53    | 9.53   | 10.31  | 14.27   | 12.70  | 12.70   | 17.48   | 21.44   | 25.40   | 28.58   | 33.32 | 25.40 |  |
| 14                | 350                   | 355.6                           | 3.96   | 4.78   | 6.35   | 7.92   | 9.53    | 9.53   | 11.13  | 15.09   |        | 12.70   | 19.05   | 23.83   | 27.79   | 31.75   | 35.71 |       |  |
| 16                | 400                   | 406.4                           | 4.19   | 4.78   | 6.35   | 7.92   | 9.53    | 9.53   | 12.70  | 16.66   |        | 12.70   | 21.44   | 26.19   | 30.96   | 36.53   | 40.49 |       |  |
| 18                | 450                   | 457.2                           | 4.19   | 4.78   | 6.35   | 7.92   | 11.13   | 9.53   | 14.27  | 19.05   |        | 12.70   | 23.83   | 29.36   | 34.93   | 39.67   | 45.24 |       |  |
| 20                | 500                   | 508                             | 4.78   | 5.54   | 6.35   | 9.53   | 12.70   | 9.53   | 15.09  | 20.62   |        | 12.70   | 26.19   | 32.54   | 38.10   | 44.45   | 50.01 |       |  |
| 22                | 550                   | 558                             | 4.78   | 5.54   | 6.35   | 9.53   | 12.70   | 9.53   |        | 22.23   |        | 12.70   | 28.58   | 34.93   | 41.28   | 47.63   | 53.98 |       |  |
| 24                | 600                   | 610                             | 5.54   | 6.35   | 6.35   | 9.53   | 14.27   | 9.53   | 17.48  | 24.61   |        | 12.70   | 30.96   | 38.89   | 46.02   | 52.37   | 59.54 |       |  |
| 26                | 660                   |                                 |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 28                | 700                   | 711                             |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 30                | 762                   | 6.35                            | 7.92   | 7.92   | 12.70  | 15.88  |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 32                | 800                   | 813                             |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 34                | 884                   |                                 |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 36                | 900                   | 914                             |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 38                | 965                   |                                 |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 40                | 1000                  | 1016                            |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 42                | 1067                  |                                 |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 44                | 1100                  | 1118                            |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 46                | 1168                  |                                 |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |
| 48                | 1200                  | 1219                            |        |        |        |        |         |        |        |         |        |         |         |         |         |         |       |       |  |

Sl.3 Tablica dimenzija, Izvor <https://hr.yzpipes.com/info/steel-pipe-dimensions-sizes-chart-40-schedule-75586491.html> (26.08.2024.)

Primjena bešavnih cijevi ovisi o debljini stjenke cijevi. Za proizvodnju cijevi s debljim stjenkama potrebne su više temperature koje smanjuju otpornost na deformaciju što rezultira većim progibom.

Bešavna cijev izrađena je od cilindrične šipke iz vrućeg čelika.

Šipka se zagrijava na visoku temperaturu, a zatim se umetne trn pa se izradi otvor kroz šipku. Proizvod se zatim prenosi na valjke koji dimenzioniraju cilindar na zadani promjer i debljinu stjenke. Nekoliko tvornica može proizvesti bešavne cijevi promjera do promjera  $\theta$  60,96 mm (odnosno u anglosanksonskoj mjeri  $\theta$  24 inča). Bešavne metode proizvodnje koriste se za cijevi malog promjera. Kod većih promjera koriste šavne cijevi (zavareni šav).

Iako se u nekim sustavima koriste bešavne cijevi, većina cjevovoda ima uzdužni zavar ili šav. Dugi šav, kako se naziva, najčešće se izrađuje zavarivanjem pod praškom ili sućeonim zavarivanjem. Zavarivanje pod praškom sadrži dodatni metal koji se malo razlikuje od sastava tijela cijevi, a zona pod utjecajem topline pored metala zavara ima mikrostrukturu drugačiju od one ostatka cijevi. Sućeoni zavari, koji može biti elektrootporni ili brzi zavari, ne sadrže dodatni metal, a zona utjecaja topline ima drugačiju mikrostrukturu. Budući da te različite mikrostrukture mogu biti podložnije koroziji od okolnog metala, ponekad se može pojaviti selektivna korozija na spoju s malo susjednih oštećenja uzrokovanih korozijom. Ako šav sadrži pukotine ili diskontinuitete koji sami po sebi nisu dovoljno veliki da uzrokuju kvar, korozija na istom području može povećati takve nedostatke do kritične veličine i ubrzati curenje ili puknuće. Određene verzije cijevi, uključujući cijevi proizvedene prije 1971. otporne na električno zavarivanje niske frekvencije (ERW), pokazale su probleme povezane sa šavovima koji mogu biti posebno osjetljivi na selektivnu koroziju šavova.

Gredice i zavojnice isporučuju se u tvornicu cijevi spremni za izradu cijevi od ugljičnog čelika. Ovisno o mogućnostima tvornice cijevi i krajnjoj upotrebi konačnog proizvoda, odljevci će se oblikovati u cijev pomoću četiri različita načina proizvodnje. Bešavna cijev od ugljičnog čelika nema, uzdužni zavareni šav. To je čvrsti homogeni komad čelika. Čvrsta gredica se zagrijava i zatim rasteže preko niza igala dok cijev ne postigne željeni promjer i debljinu stjenke.

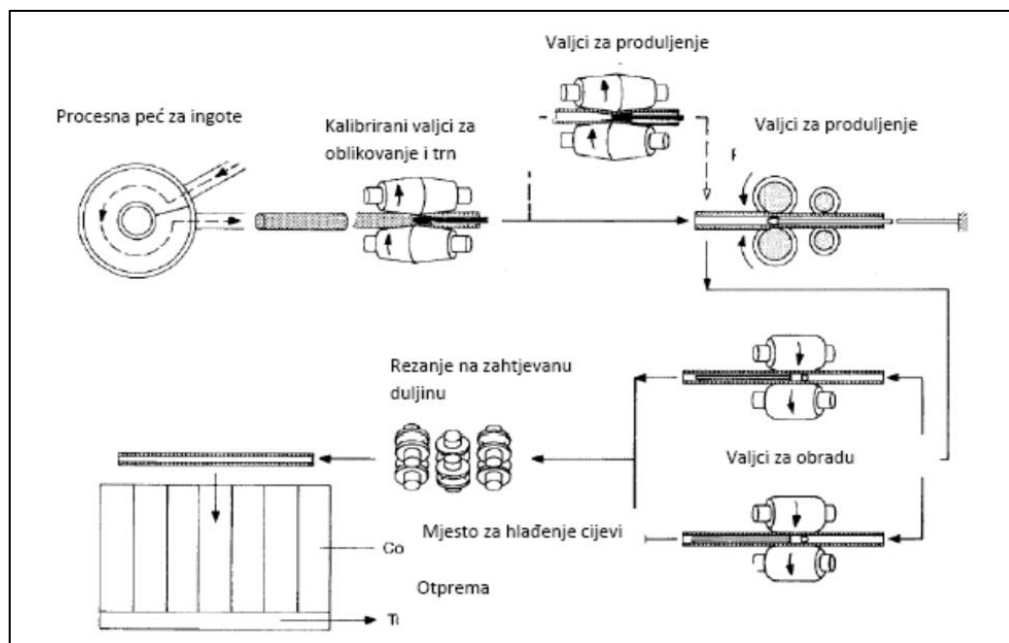
Prema načinu proizvodnje, bešavne čelične cijevi se dijele na toplo valjane bešavne čelične cijevi, hladno valjane bešavne čelične cijevi, hladno vučene bešavne čelične cijevi, ekstrudirane bešavne čelične cijevi i gornje cijevi. Prema obliku poprečnog presjeka, bešavne čelične cijevi dijele se na dvije vrste: okrugle i posebne. Lule posebnog oblika uključuju četvrtaste, ovalne, trokutaste, šesterokutne lule, lule sa sjemenkama dinje, zvjezdaste i

rebraste lule. Maksimalni promjer je 900 mm, a minimalni promjer je  $\theta 4$  mm. Prema različitim namjenama, postoje bešavne čelične cijevi debelih stijenki i bešavne čelične cijevi tankih stijenki. Bešavne čelične cijevi uglavnom se koriste kao cijevi za naftno geološko bušenje, u petrokemijskoj industriji, cijevi za kotlove, cijevi za ležajeve i visoko precizne strukturne čelične cijevi za automobile, traktore i zrakoplovstvo.

### 3.2. Produkcija

Tehnološki proces proizvodnje bešavnih cijevi se odvija u valjaonicama i započinje u tvorničkoj procesnoj peći gdje se rastaljeni metal, mješavina željeza i koksa za dobivanje čelika, oblikuje i hladi u primarni poluproizvod, metalni ingot.

Ingoti nastavljaju kretanje po procesnoj liniji i prolaze kroz valjke za oblikovanje pod velikim pritiskom, tada nastaju veliki cilindri, što je prikazano na slici.



Sl.4 Shematski prikaz proizvodnje bešavnih cijevi, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

#### Faze proizvodnje bešavnih cijevi od nehrđajućeg čelika:

1. Odabir standarda kvalitete cijevi od nehrđajućeg čelika
2. Zatim slijedi višeprolazni hladno vučena i valjana cijev u mlinu s više valjaka
3. Nakon hladno valjane cijevi, iste će biti tvrđe (teško će se savijati i vršenje ostalih obrada kojima je tvrdoća smetnja). Kako bi se postigli potrebni standardi mehaničkih svojstava, proizvod se izlaže normalizacijskom žarenju, zatim obradom na otpornost površine na kemijske utjecaje, te demagnetizacijom.

4. Zatim se vrši obrada čišćenja cijevi. Vršiti se obrada u kiseloj okolini, kojoj je za cilj uklanjanje ulja i druge nečistoće (kemijske i fizičke) s površine obradka,
5. Zatim se vrši proces poliranja unutrašnjeg i vanjskog dijela stijenke cijevi do tkz zdravstvenog standarda.
6. Zatim se ispituje nepropusnost proizvedene cijevi. Uz nepropusnost, kontrolira se predvođeni radni tlak. Nakon ispitivanja, uz potpisane certifikate, proizvod odlazi u skladište

### 3.3. Materijali

Materijali za izradu bešavnih cijevi definiraju se prema važećim međunarodnim standardima kao što su API, AISI, ASME, DIN i HRN. U nastavku slijedi detaljan opis materijala koji se koriste za izradu bešavnih cijevi.

- Bakrene cijevi. Bakar je metal male tvrdoće, dobre toplinske vodljivosti i otpornosti na utjecaj korozije. Ne podnosi visoke temperature, jer se tada čvrstoća naglo smanjuje. Bešavne bakrene cijevi proizvode se izvlačenjem. Debljina stijenke iznosi 1 mm do 10 mm. Izvlačenje bakrenih cijevi malog promjera i velikih dužina izvodi se pomoću tzv. trna koji nema držača, već stoji u otvoru matrice pridržavan silama trenja. Takve se cijevi isporučuju u kolutima. Bakrene cijevi su skuplje od čeličnih, ali je njihova instalacija jednostavnija zbog velike savitljivosti i jednostavne prilagodbeoblika cijevi prostoru ugradnje.

- Mjedene cijevi. Mjed ili mesing je slitina bakra i cinka, vrlo otporna prema koroziji i boljih mehaničkih svojstava od bakra. Kao i kod bakra, pri višim temperaturama mehanička svojstva znatno opadaju. Danas je ovih mjedenih cijevi ograničena zbog uporabe novih materijala boljih osobina.

- Al-Ms slitina za izradu bešavnih cijevi je slitina sastava 76% Cu, 21,96% Zn, 2% Al i 0,04% As. Cijevi su vrlo otporne prema koroziji, jer se ubrzo nakon puštanja u rad, poput bakra, presvuku filmom oksida koji ih štiti od daljnje korozije. Otporne su prema djelovanju morske vode, kao i prema djelovanju kiselina i svih naftnih derivata.

- Cu-Ni slitina je sastavljena od 87,3% Cu, 10% Ni, 1,7% Fe i 1% Mn. Osobine i mehanička svojstva ovakvih cijevi slična su prethodno opisanim cijevima, ali im je manja masa i cijena niža pa se sve više upotrebljavaju za izradu cjevovoda gdje su izložene pojačanom djelovanju korozije (morska rashladna voda, grijanje tankova tekućeg tereta kod tankera, tankova taloga u strojarnici, cjevovod kondenzata, izmjenjivača topline). Udjeli željeza i mangana povećavaju otpornost cijevi prema eroziji i koroziji.

- Cijevi od nehrđajućeg čelika (AISI cijevi). Pod nehrđajućim čelikom podrazumijeva

se čelik čije trošenje zbog korozije nije veće od 0,1 mm u godini dana, što omogućuje tanki film oksida kroma na površini čelika. Kod nehrđajućih čelika javlja se nekoliko tipova korozije, od kojih su neki vrlo brzi u svom djelovanju tako da za vrlo kratko vrijeme može doći do jakog razaranja materijala i velikih šteta. Koriste

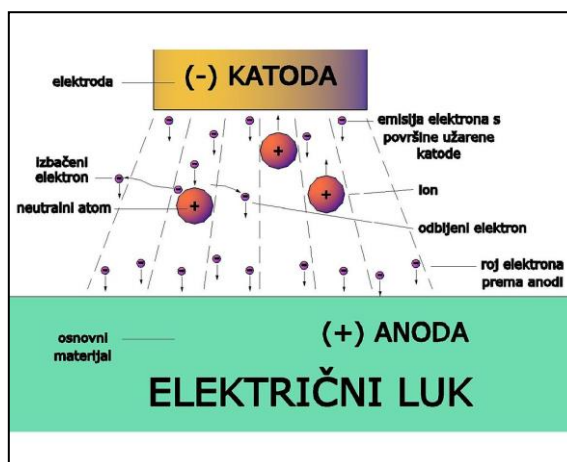
se za izradu cjevovoda sistema tekućeg tereta na tankerima za prijevoz kemikalija

- Dupleks cijevi. Dupleks čelici su čelici dvofazne strukture, tj. oni imaju podjednak udio austenita i ferita. Taj materijal otporan je na koroziju. U brodogradnji se koristi za izgradnju cjevovoda radne hidraulike za pogon uronjenih pumpi tereta.

### 3.4. Postupci zavarivanja

#### 3.4.1. REL postupak zavarivanja

Ručno elektrolučno zavarivanje (MMA ili MMAW), također poznato kao zaštićeno elektrolučno zavarivanje (SMAW), elektrolučno zavarivanje zaštićenim praškom ili štapno zavarivanje, proces je u kojem se električni luk pali između metalne šipke obložene praškom elektrode i radnog komada. I šipka i površina radnog komada se tope kako bi se stvorio zavar.



Sl.5 Elektronski tok, Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno\\_elektrolu%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)

(26.08.2024.)

Elektroda, koja je električki negativna, katoda, kod uspostave električnog luka izbacuje elektrone. Roj elektrona se kreće prema anodi (radni materijal, koji je ujedno i električki pozitivna elektroda) i na taj se način stvara električni luk, te se stvaraju visoke temperature i omogućava zavarivanje.

Kako bi zapalio luk između elektrode i osnovnog metala, kao što je ugljični čelik, i proizveo kvalitetan zavar, štapni zavarivač mora osigurati da su njegovi strojevi za

zavarivanje opremljeni odgovarajućim elektrodama. Stabilnost luka, dubina prodiranja, brzina taloženja metala i sposobnost položaja uvelike su pod utjecajem kemijskog sastava premaza topitelja na elektrodi. Elektrode se mogu podijeliti u tri glavne skupine:

1. Celulozna
2. Rutil
3. Osnovni, temeljni

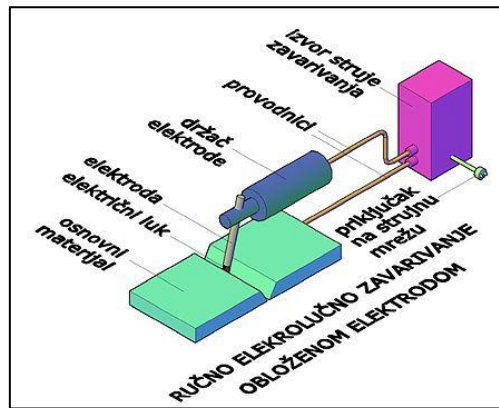
Celulozne elektrode sadrže visok udio celuloze u premazu i karakterizirane su dubokim prodiranjem luka i brzom brzinom sagorijevanja što daje velike brzine zavarivanja. Talog zavara može biti grub, a s tekućom troskom uklanjanje troske može biti teško. Ove se elektrode lako koriste u bilo kojem položaju i poznate su po svojoj uporabi u tehnici zavarivanja u "pečnoj cijevi".

Rutilne elektrode sadrže visok udio titanijevog oksida (rutila) u premazu. Titanijev oksid potiče jednostavno paljenje luka, glatki rad luka i malo prskanja. Ove elektrode su elektrode opće namjene s dobrim svojstvima zavarivanja. Mogu se koristiti s AC i DC izvorima napajanja i u svim položajima. Elektrode su posebno prikladne za zavarivanje kutnih spojeva u horizontalnom/vertikalnom (H/V) položaju.

Bazične elektrode sadrže visok udio kalcijevog karbonata (vapnenac) i kalcijevog fluorida (fluorid) u premazu. To njihovu prevlaku od troske čini fluidnijom od rutilnih prevlaka - ovo je također brzo smrzavanje što pomaže zavarivanju u okomitom i iznad glave. Ove se elektrode koriste za zavarivanje srednjih i teških presjeka gdje se zahtijeva veća kvaliteta zavara, dobra mehanička svojstva i otpornost na pucanje (zbog velikog ograničenja).

Elektrode od metalnog praha sadrže dodatak metalnog praha u premazu topitelja za povećanje najveće dopuštene razine struje zavarivanja. Dakle, za određenu veličinu elektrode, stopa taloženja metala i učinkovitost (postotak nataloženog metala) su povećani u usporedbi s elektrodom koja ne sadrži željezni prah u premazu. Šljaka se inače lako uklanja. Elektrode od željeznog praha uglavnom se koriste u ravnim i H/V položajima kako bi se iskoristile veće stope taloženja. Učinkovitost od čak 130 do 140% može se postići za rutilne i bazične elektrode bez značajnog pogoršanja karakteristika luka, ali luk ima tendenciju biti manje jak što smanjuje prodiranje kuglica.





Sl.6 Shematski prikaz REL zavarivanja, Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno\\_elektrodo%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrodo%C4%8Dno_zavarivanje) (26.08.2024.)

Prednosti:

- jeftina oprema,
- širok spektar elektroda,
- koristi se za sve konstrukcijske čelike, Cu, Ni, Ti i dr.,
- za sve debljine zavara (od 1 mm do 100 mm),
- izvedivo je višeslojno zavarivanje,
- zavarivanje u svim položajima.

Nedostaci:

- postupak se obavlja ručno (mogućnost greške),
- puno dimova (potrebna ventilacija),
- stvaranje troske (opasnost troska u zavaru),
- otpad – moraju se ukloniti,
- prekidi i uspostavljanje luka – moguće pogreške

### 3.4.2. MIG/MAG postupak zavarivanja

Općenito MIG zavarivanje je postupak elektrodočnog zavarivanja u kojem se kontinuirano čvrsta žičana elektroda dovodi kroz pištolj za zavarivanje u zavarenu posudu, spajajući dva osnovna materijala. Zaštitni plin također se šalje kroz pištolj za zavarivanje i štiti bazen za zavarivanje od kontaminacije.

Naziv MIG/MAG dolazi od engleskih izraza *Metal Inert Gas* (Metal - inertan plin), odnosno *Metal Active Gas* (Metal - aktivni plin).

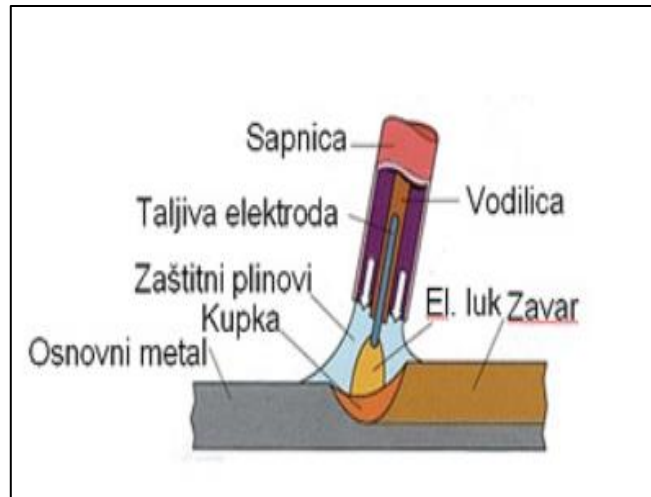
Kod MIG postupka zavarivanje ostvaruje pod zaštitom inertnog plina, kod MAG

postupka aktivan plin sudjeluje u zavarivanju.

Kod MIG/MAG zavarivanja metalna elektroda namotana na kolut se potiskuje kroz vodilicu u pištolju za zavarivanje gdje se tali u električnom luku uz zaštitu plina i prenosi u rastaljeni metal kojeg se zavaruje.

Kod MIG zavarivanja se koriste neutralni, odnosno inertni plinovi poput argona, helija ili njihovih mješavina.

Kod MAG zavarivanja koriste se aktivni plinovi, najčešće CO<sub>2</sub> i njegove mješavine s drugim plinovima, zbog ovoga se taj tip zavarivanja ponekad naziva i CO<sub>2</sub> zavarivanje.



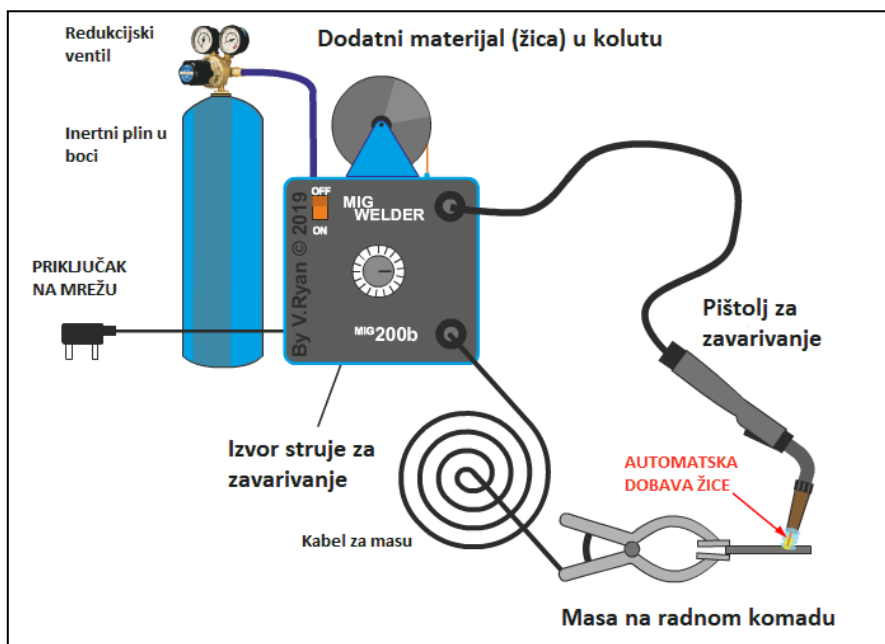
Sl.7 MIG/MAG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Najčešće primjene MIG/MAG zavarivanja su kod zavarivanja obojenih metala, zavarivanje tankih limova, visokolegiranih čelika i drugih metala koji se vežu s kisikom.

Riječ je o izuzetno brzom metodi zavarivanja koja je primjenjiva na sve vrste metala, u svim položajima i moguće ju je automatizirati, odnosno robotizirati.

MIG/MAG aparati za zavarivanje kao i vezana oprema se mogu relativno lako nabaviti, a neki uređaji za industrijsku namjenu su i dosta skupi.

MIG proces omogućuje, pored industrijske uporabe, i korištenje u neprofesionalne svrhe (hobi, kućne popravke i izradbe, itd). Relativno je brza edukacija, te se uz vježbanje mogu polučiti vrlo dobri rezultati.



Sl 8 Shematski prikaz uređaja za MIG/MAG zavarivanje, Izvor: <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja> (26.08.2024.)

### Prednosti MIG/MAG zavarivanja

MIG/MAG zavarivanje jedan je od najčešće korištenih postupaka zavarivanja te uključuje:

1. Čišći proces: Budući da se za zaštitu luka koristi zaštitni plin, stvara se minimalno prskanje i nema troske koju je potrebno naknadno čistiti.
2. Velika radna brzina: MIG/MAG zavarivanje se smatra operacijom "jednom rukom" i omogućuje zavarivačima da poboljšaju kontrolu uz održavanje konstantne brzine.
3. Svestranost: MIG/MAG zavarivanje može se izvesti u većini položaja zavarivanja.
4. Isplativost: U usporedbi s drugim metodama zavarivanja, MAG zavarivanje može biti jeftinije tijekom vremena, budući da vrhovi elektroda obloženi toplom nisu spaljeni i ne moraju se mijenjati.

### Nedostaci MIG/MAG zavarivanja:

1. Ne može se koristiti na otvorenom: s obzirom na to da MAG zavarivanje koristi zaštitni plin tijekom procesa, može se raditi samo u zatvorenom prostoru, budući da vjetar može otpuhati plin i kontaminirati projekt.
2. Osjetljivost na kontaminante: Stvari poput hrđe, prljavštine, ulja i boje mogu uzrokovati probleme s MIG/MAG zavarivanjem, koje može biti osjetljivo na te tvari.

3. Osjetljivo na poroznost i nedostatak fuzije: Poroznost je uzrokovana zarobljenim dušikom i kisikom zbog slabe zaštite od plina. Nedovoljno čišćenje površine može doprinijeti nedostatku fuzije.

MIG/MAG varovi koriste aktivne zaštitne plinove. To mogu biti mješavine CO<sub>2</sub>, kisika ili argona. Ponekad se zaštitni plin sadrži 100% CO<sub>2</sub>.

Tijekom procesa MIG/MAG zavarivanja, luk se stvara između elektrode i izradka. Istosmjerna struja koristi se u procesu za zagrijavanje metala i njihovo spajanje. Korištena elektroda kontinuirano se dovodi pomoću dodavača žice u bazen za zavarivanje.

MIG/MAG zavarivanje koristi aktivni plin zbog kojeg dobro reagira s konstrukcijskim čelicima i debelim do srednje debelim limom. MAG zavarivanje proizvodi intenzivnu toplinu, koja može uzrokovati razdvajanje CO<sub>2</sub> na ugljični monoksid i kisik. To može uzrokovati djelomičnu oksidaciju, zbog čega se MAG ne koristi za zavarivanje lakih čelika ili legiranih metala.

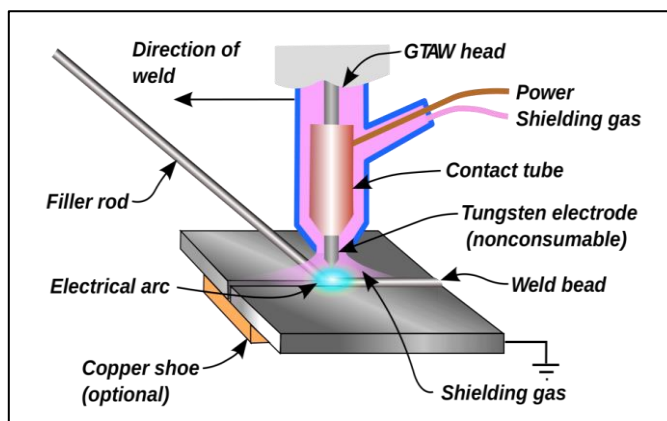
### 3.4.3. TIG postupak zavarivanja

Naziv ove metode zavarivanja dolazi od engleskog izraza *Tungsten Inert Gas*, ali se ponekad može naići na izraz WIG zavarivanje od njemačkog izraza *Wolfram Inert Gas*. Tungsten, odnosno Wolfram su oboje nazivi za metal volfram.

U TIG postupku elektroda od volframa u neutralnom, odnosno inertnom zaštitnom plinu se ne tali već usmjeruje intenzivan električni luk na metal kojeg želimo zavariti. Na ovaj način moguće je spojiti osnovni metal bez, ili prema potrebi uz dovođenje dodatnog materijala.

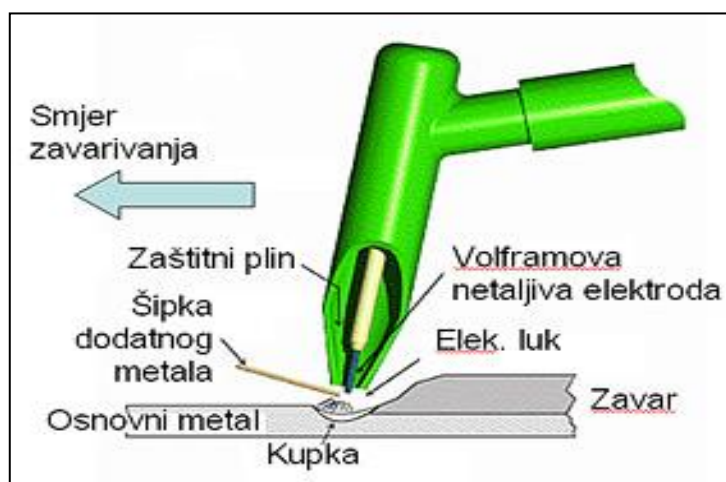
TIG metoda zavarivanja je vrlo precizna i visokokvalitetna. Iako je razvijena za potrebe zavarivanja magnezija i legura magnezija, danas se koristi za širok raspon metala.

TIG zavarivanje koristi izmjeničnu struju za zavarivanje aluminija, magnezija i njegovih legura. Za zavarivanje nehrđajućih čelika, titana, bakra, čeličnih limova i ostalih materijala koristi se istosmjerna struja s minus polom na elektrodi.



Sl.9 TIG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Zavarivanje inertnim plinom (TIG) polučio je uspjeh 1940-ih za spajanje magnezija i aluminija. Korištenjem zaštite od inertnog plina umjesto troske za zaštitu bazena za zavarivanje, postupak je bio vrlo kvalitetna zamjena za plinsko i ručno zavarivanje metalnim lukom. TIG je odigrao veliku ulogu u prihvaćanju aluminija za visokokvalitetno zavarivanje i konstrukcijske primjene. U postupku TIG zavarivanja luk se formira između šiljaste volframove elektrode i izratka u inertnoj atmosferi argona ili helija. Mali intenzivni luk koji stvara šiljasta elektroda idealan je za visokokvalitetno i precizno zavarivanje. Budući da se elektroda ne troši tijekom zavarivanja, TIG zavarivač ne mora uravnotežiti unos topline iz luka dok se metal taloži s elektrode za taljenje. Kada je potreban dodatni metal, mora se dodati zasebno u žlijeb u kojem se nanosi dodatni materijal za zavarivanje.



Sl.10 TIG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Elektrode za TIG zavarivanje obično su čisti volfram s 1 do 4% torija radi poboljšanja paljenja luka. Alternativni dodaci su lantanov oksid i cerijev oksid za koje se tvrdi da daju superiorne performanse (pokretanje luka i manja potrošnja elektrode). Kod TIG zavarivanja je

važno odabrati optimalan promjer elektrode i sam kut elektrode prema izratku. U pravilu, što je niža jakost struje, to su manji promjer elektrode i kut vrha. U zavarivanju izmjeničnom strujom, budući da će elektroda raditi na mnogo višoj temperaturi, volfram s dodatkom cirkonijevog oksida koristi se za smanjenje erozije elektrode. Zbog velike količine topline koja se stvara na elektrodi, teško održati šiljasti vrh i kraj elektrode poprima sferni ili 'kuglasti' profil.

Zaštitni plin odabire se prema materijalu koji se zavaruje. Sljedeće smjernice mogu pomoći:

1. Argon - najčešće korišteni zaštitni plin koji se može koristiti za zavarivanje širokog spektra materijala uključujući čelik, nehrđajući čelik, aluminij i titan.
2. Argon + 2 do 5% H<sub>2</sub> - dodavanje vodika argonu će dovesti do blagog reduciranja plina, pomažući u proizvodnji čistih varova bez oksidacije površine. Kako je luk topliji i suženiji, to dopušta veće brzine zavarivanja. Nedostaci uključuju rizik od vodikovog pucanja u ugljičnim čelicima i poroznost metala zavarivanja u aluminijskim legurama.
3. Helij i mješavine helija/argona - dodavanje helija argonu povisit će temperaturu luka. To potiče veće brzine zavarivanja i dublje prodiranje zavara. Nedostaci korištenja helija ili mješavine helija/argona su visoki troškovi plina i teškoće u pokretanju luka.

Zaštitni plinovi koji se najčešće koriste za TIG zavarivanje štite materijal od onečišćenja. Ovaj način zavarivanja je relativno spor, ograničen na tanke materijale i skup (zbog opreme, zaštitnog plina i volframa).

## **4. MEHANIČKA SVOJSTVA ZAVARENIH SPJEVA I MIKROSTRUKTURA ZAVARA**

Nakon završetka proizvodnog ciklusa, bešavne cijevi prolaze proces ispitivanja mehaničkih svojstava kako bi se utvrdila njihova kvaliteta. Naravno, kod ugradnje/montaže bešavnih cijevi, ispituju se mehanička svojstva zavarenih spojeva, kao garancija kvalitete i mogućnost korištenja bez posljedica za mehaničku strukturu. Nakon ispitivanja mehaničkih svojstava, izdaje se certifikat o kvaliteti i proizvoda i zavarenih konstrukcija.

Dvije su vrste metoda koje se koriste za ispitivanje materijala. To su mehaničko ispitivanje s razaranjem i ispitivanje bez razaranja. Metode mehaničkog ispitivanja s razaranjem rezultiraju uništavanjem ispitnog uzorka i daju informacije o mehaničkim ili fizičkim svojstvima materijala. Ispitivanja bez razaranja ne uništava uzorak ili proizvod koji se ispituje, a daju podatke o kvaliteti ispitanog materijala.

### **4.1. Metode ispitivanja bez razaranja**

Metode ispitivanja bez razaranja su:

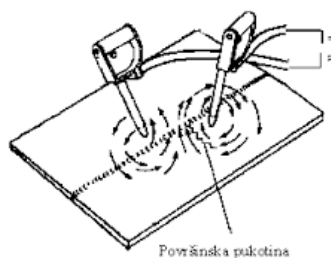
- vizualna kontrola,
- kontrola dimenzija,
- magnetska kontrola,
- ultrazvučna kontrola,
- penetrantska kontrola,
- radiografska kontrola,

Prva se primjenjuje vizualna kontrola. Metoda ne oduzima puno vremena i ne iziskuje posebne troškove, a daje korisne informacije o kvaliteti zavarenih spojeva i o potrebi kontrole nekom drugom metodom. Kod nepristupačnih djelova konstrukcije, koriste se pomagala, kao što su ogledala, svjetiljke, povećala itd.

Kod kontrole dimenzija koriste se različiti uređaji za mjerenje debljine zavara i sl.

Magnetska metoda ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva se koristi za otkrivanje površinskih i ispod površinskih grešaka (približno do dubine 6 mm) kod feromagnetičnih materijala. Koristi princip magnetske indukcije. Oko vodiča kroz koji prolazi električna struja (magnetske elektrode) formira se magnetsko polje (istosmjerne ili izmjenične struje), čije silnice prolaze kroz feromagnetični materijal koji se ispituje. Da bi se otkrila pukotina

potrebno je da smjer silnica magnetskog polja bude što više okomito na pukotinu. Ako magnetske čestice (suhe sitne čestice ili čestice pomješane sa vodom) ostanu po površini ispitivanog materijala, te ako postoji pukotina okomito na smjer prolaska silnica magnetskog polja, sitne čestice će se okupiti oko pukotine. Metoda ispitivanja je jeftina i brza, ali ima ograničenje s obzirom na ne feromagnetične materijale, greške duboko ispod površine, te nemogućnost određivanja dubine pukotine koja je otkrivena kod feromagnetičnih materijala.



Sl. 11 Ispitivanje magnetskom metodom, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

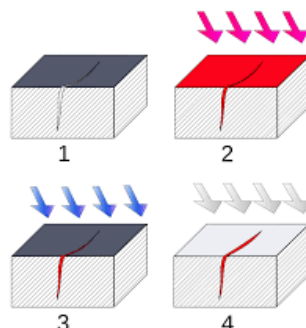
Ultrazvučna metoda ispitivanja kvalitete koristi princip ultrazvuka za širenje kroz homogene materijale i odbijanje na granici materijala različitih akustičkih svojstava (otpornosti), tj. od nehomogenosti (grešaka) u materijalu. Od izvora ultrazvuka se šire ultrazvučni valovi kroz materijal koji se ispituje. Ako u materijalu postoji greška, iza greške će ultrazvučni valovi oslabiti ili se neće pojaviti (odbiju se od greške). Ultrazvuk je vrsta mehaničkih valova frekvencije 20 KHz do 10 GHz, a kod ispitivanja najčešće se koriste frekvencije od 0,5 MHz do 10 MHz. Iako postoje različite tehnike ultrazvučnog ispitivanja, obično se u praksi koristi metoda impuls-odjek, pri čemu se koriste ravne i/ili kutne ultrazvučne glave.



Sl.12 Ispitivanje zavara ultrazvučnom metodom, Izvor: <http://pondt.hr/paut-ultrazvucno-ispitivanje-visepretvornickom-tehnikom/> (02.09,2024)

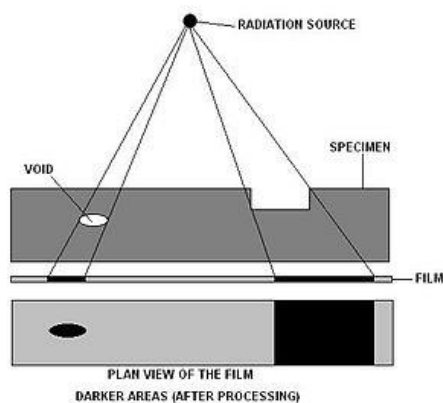


Kontrola penetrantima se koristi na način da se nakon zavara očisti površina. Nanese se penetrant i opet se očisti površina. Zatim se promatraju moguće pukotine, koje su vidljive zbog penetranta.



Sl.13 Ispitivanje zavara penetrantima, Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko\\_ispitivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko_ispitivanje) (02.09.2024.)

Radiografska kontrola koristi X-zrake i  $\gamma$ -zrake. X-zrake nastaju pri naglom kočenju ubrzanog snopa elektrona na metalnoj ploči (anodi u rendgenskoj cijevi), dok  $\gamma$ -zrake nastaju prilikom spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgri (prirodnih radioaktivnih materijala i radioaktivnih izotopa). Oba su zračenja elektromagnetska zračenja. Očišćeni uzorak zavarenog spoja se postavi u uređaj za radiografsko snimanje te se uključi emitiranje X-zraka i  $\gamma$ -zraka. Tada se napravi snimka uzorka poput one na slici 14 koja prikazuje snimku zavarenog spoja i prisutne čestice nečistoće označene strelicom. Rezultati ispitivanja ovise o kvaliteti snimke.



Sl.14 Radiografska metoda ispitivanja zavara, Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska\\_kontrola](https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska_kontrola) (02.09.2024.)

## 4.2. Metode ispitivanja s razaranjem

Metode ispitivanja s razaranjem su metode u kojima se eprueta uništi i brožani podaci rezultata služe kao parametri za vrednovanje ispitnog materijala.

Metode su sljedeće:

- mjerenje vlačne čvrstoće
- ispitivanje savijanjem
- mjerenje tvrdoće
- mjerenje udarne žilavosti (Charpy kidalica)
- makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje

#### 4.2.1. Mjerenje vlačne čvrstoće

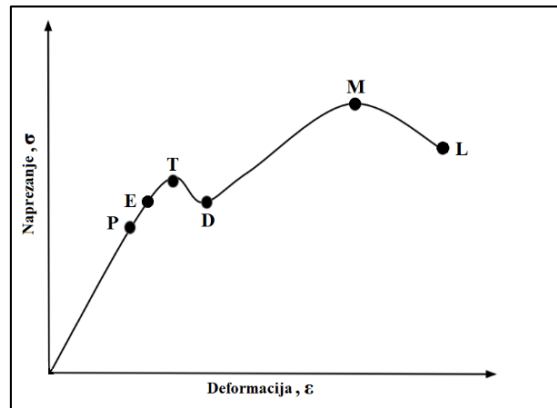
Mjerenje vlačne čvrstoće je metoda ispitivanja materijala u kojoj se ispitni uzorak podvrgava vlačnom opterećenju sve dok se ne prelomi. Vlačnim ispitivanjem određuju parametri kao što su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, modul elastičnosti, istežanje i suženje. Vlačno opterećenje postupno se povećava do loma uzorka. Tijekom ispitivanja konstantno se mjeri naprezanje primijenjeno na ispitni uzorak i njegova deformacija, odnosno istežanje. Dijagram naprezanje-deformacija generira se kako test napreduje, a podaci se pohranjuju u računalo za naknadnu analizu. Naprezanje koje djeluje na ispitni uzorak može se definirati kao

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{MPa}$$

Kada sila djeluje na materijal, unutar materijala se razvija naprezanje koje generira deformaciju, odnosno promjenu dimenzija. Deformacija može biti elastična; u tom se slučaju materijal vraća na svoje početne dimenzije po prestanku djelovanja naprezanja. Deformacija također može biti plastična, pri kojoj po prestanku djelovanja naprezanja ostaju deformacije, tj. materijal se ne vraća na svoje početne dimenzije. Kada je deformacija elastična, većina materijala ponaša se u skladu s Hookeovim zakonom koji definira da je deformacija izravno proporcionalna naprezanju koje ju uzrokuje. Plastična deformacija, za razliku od elastične, nije izravno proporcionalna naprezanju. Mnogi materijali pokazuju i elastično i plastično ponašanje, pri čemu je deformacija potpuno elastična pri nižim razinama naprezanja, a elastična i plastična pri višim. Prijelaz s elastičnog na plastično ponašanje materijala može biti postupan ili trenutni. Naprezanje pri kojoj dolazi do nagle promjene u plastičnu deformaciju naziva se granicom razvlačenja.

Podaci dobiveni tijekom vlačnog ispitivanja iscrtavaju se u  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram, odnosno dijagram naprezanje-deformacija. Na njemu se nalazi nekoliko karakterističnih točaka bitnih

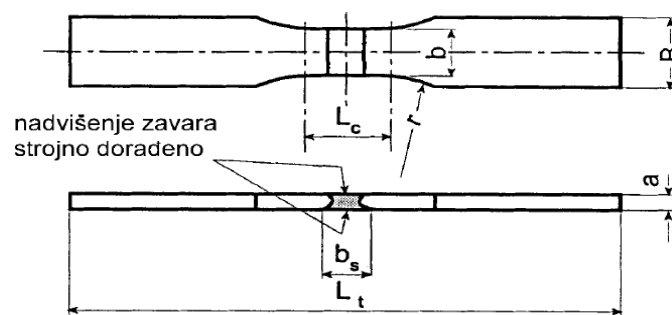
za definiranje svojstava materijala pri vlačnom ispitivanju.



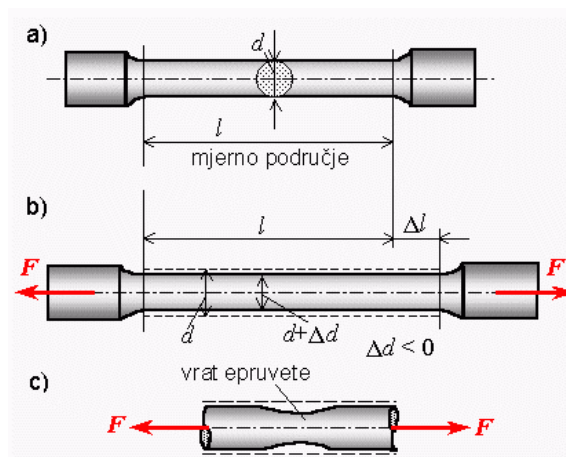
Sl.15 Hookov dijagram, Izvor: Obrada autora

Ispitivanje se vrši na kidalici, uz epruete:

- Plosnate, prema normi EN 895
- Okrugle, prema normi EN 876



Sl.16 Plosnata eprueta EN 895, Izvor: : Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24



Sl.17 Okrugla eprueta EN 876 kroz faze razvlačenja, a) ispitna eprueta, b) deformacije epruete kod rastezanja, c) pojava vrata na eprueti, Izvor:

[https://sfsb.unisb.hr/ksk/statika/cvrstoca/web\\_cvrstoca/E\\_ovisnost\\_napdef/a\\_veza\\_napr\\_def/E\\_s\\_67\\_1.htm](https://sfsb.unisb.hr/ksk/statika/cvrstoca/web_cvrstoca/E_ovisnost_napdef/a_veza_napr_def/E_s_67_1.htm)

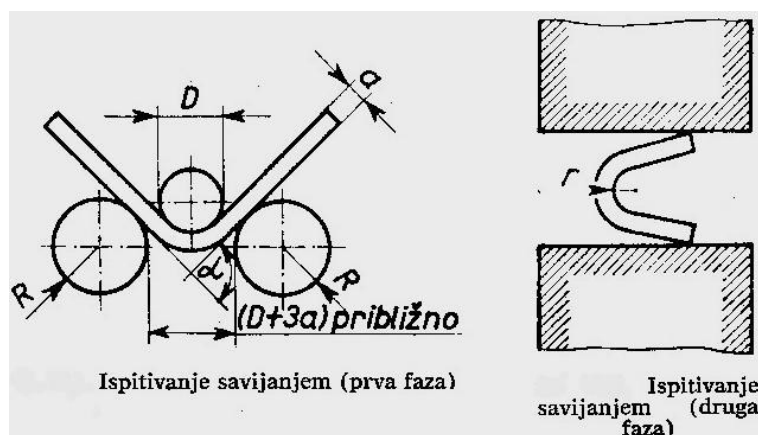
(02.09.2024.)

#### 4.2.2. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem je metoda s razaranjem kod ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. Mjere se mehaničke osobine materijala kod plastične deformacije pri savijanju. Ispitivanje se sastoji od savijanja ispitnog uzorka okruglog, kvadratnog ili pravokutnog poprečnog presjeka, bez promjene smjera opterećenja, dok se ne postigne određena plastična deformacija savijanjem, odnosno određeni kut savijanja (najčešće  $180^\circ$ ).

Pri ispitivanju zavarenih spojeva ispitivanje savijanjem koristi se za procjenu duktilnosti i kvalitete spojeva. Ova ispitivanja se izvode savijanjem ispitnog uzorka na određeni polumjer. Vanjska površina savijenog uzorka podvrgnuta je opterećenjem na vlak, što može uzrokovati lomove i pukotine u krhkim materijalima ili otvoriti postojeće diskontinuitete zavara, kao što su poroznost ili nepotpuno spajanje. Nakon savijanja treba pregledati vanjsku površinu i stranice ispitnog uzorka. Tijekom savijanja na uzorku ne smiju nastati pukotine koje su veće od 3 mm u bilo kojem smjeru.

Ispitni uzorci za test savijanja mogu biti uzdužni ili poprečni u odnosu na zavar. Uzdužno ispitivanje savijanjem rijetko se koristi, eventualno kod procjene kvalitete spojeva različitih osnovnih metala. Poprečno ispitivanje savijanjem može biti preko lica, korijena ili bočno, ovisno o području ispitnog uzorka koje je opterećeno na vlak. Ispitivanje savijanjem preko lica izvodi se s vlačno opterećenim licem zavara. Savijanje preko korijena stvara vlačno opterećenje u korijenu zavara. Kod bočnog savijanja strana na koju se uzorak savija nije bitna. Bočna savijanja obično se koriste kada se ispituju uzorci deblji od 10 mm. Ispitivanja bočnog savijanja opterećuju cijeli presjek zavara te su posebno korisna za otkrivanje diskontinuiteta koji se ne otkrivaju u testovima savijanja preko korijena ili lica zavara.



Sl.18. Ispitivanje savijanjem(I i II faza), Izvor: <https://ironlady003.wordpress.com/2013/10/03/tehnoloska-ispitivanja/> (02.09.2024.)

### 4.2.3. Ispitivanje tvrdoće

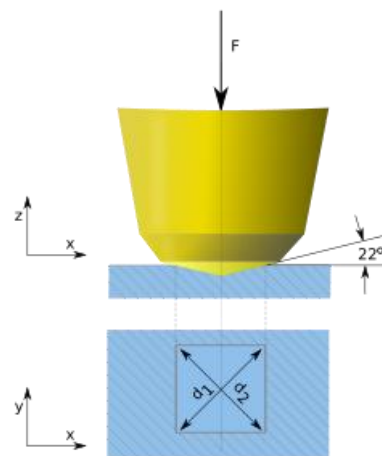
Tvrdoća se definira kao sposobnost materijala da se odupre plastičnoj deformaciji uslijed prodiranja krutog tijela. Općenito, tvrdoća materijala se mjeri pritiskom utiskivača, poznate geometrije i mehaničkih svojstava, u ispitni materijal. Budući da je utiskivač utisnut u materijal tijekom ispitivanja, tvrdoća se također promatra kao sposobnost materijala da se odupre tlačnim opterećenjima. Rezultati ispitivanja tvrdoće također se često koriste kao brza metoda za aproksimaciju vlačne čvrstoće u testiranom lokalnom području. Mjerenja tvrdoće također mogu pružiti informacije o metalurškim promjenama uzrokovanim zavarivanjem. U legiranim čelicima visoka tvrdoća može ukazivati na prisutnost martenzita u zoni utjecaja topline, dok niska tvrdoća može ukazivati na prekaljeno stanje. Zavarivanje može uzrokovati znatno nižu tvrdoću u zoni utjecaja topline hladno obrađenog metala zbog rekristalizacije.

Metode mjerenja tvrdoće metalnih materijala:

- Metoda po Vickersu (HV)
- Metoda po Rockwellu (HRC i HRB)
- Metoda po Brinellu (HB)

Navedene metode mjere otpornost materijala prema prodiranju žiga. Prema obliku žiga razlikuju se i metode mjerenja.

Vickersova metoda se bazira na prodiranju dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$ .

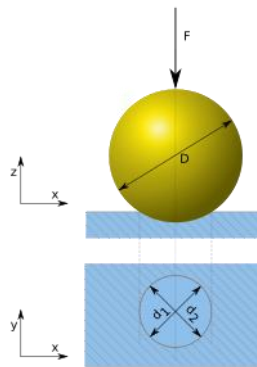


Sl.19 Shematski prikaz Vickersove metode, Izvor <https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a> (02.09.2024)

Metoda po Rockwellu se bazira na prodiranju dijamantnog stošca vršnog kuta  $120^\circ$  s vrhom zaobljenje od 0,2 mm.

Metoda po Brinellu se bazira na otporu kojeg stvara kuglica promjera D (mm), tlačena

silom  $F$  (N). U materijalu nastaje utor kuglastog oblika promjera baze  $d$  i dubine  $h$ . Temeljem dobivenih rezultata se očitava tvrdoća HB.



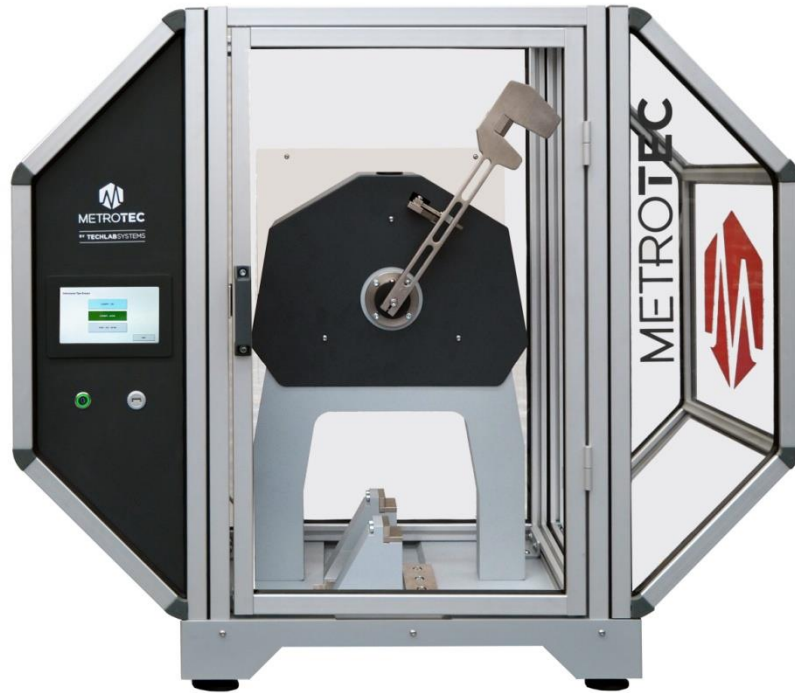
Sl.20 Shematski prikaz Brinellove metode, Izvor <https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a> (02.09.2024)

#### 4.2.4. Mjerenje udarne žilavosti

Ispitivanje udarnog rada loma je razorna metoda koja se koristi za ispitivanje žilavosti materijala. Žilavost je sposobnost materijala da izdrži udarna opterećenja bez da dođe do loma. Kada na materijal djeluje neko vanjsko naprezanje, materijal će se deformirati. Ako se veličina naprezanja poveća, materijal će se slomiti. Ne lome se svi materijali na isti način; razlikujemo krhki lom i žilavi lom. Kod žilavog loma javlja se znatna količina plastične deformacije materijala, dok je plastična deformacija kod krhkog loma mala ili je uopće nema. Vrsta loma koja se događa uvelike ovisi o vrsti materijala i njegovom stanju, ali na kvar također utječu i drugi čimbenici kao što su vrsta naprezanja, brzina primjene naprezanja i temperatura i utjecaj okoline.

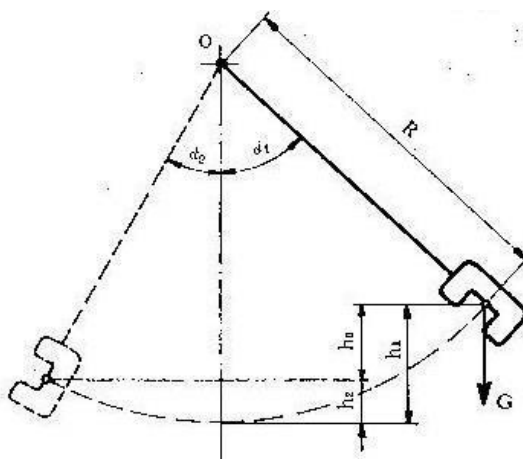
Ispitivanja udarnog rada loma relativno su jednostavna te se lako i brzo izvode. Princip je da se ispitni uzorak, koji sadrži izgledani zarez, udari batom koji se brzo kreće te se izmjeri energija koja se apsorbira pri lomljenju ispitnog komada. Energija utrošena za lom uzorka mjera je žilavosti materijala koji se ispituje. Ova vrsta ispitivanja ima prednost u otkrivanju sklonosti lomljivosti koja se ne otkriva ni s vlačnim ispitivanjem ni ispitivanjem tvrdoće.

Najčešće korištena vrsta ispitivanja udarnog rada loma je ispitivanje na Charpyjevo kidalici.



Sl.21 Charpy kidalica, Izvor: <https://amlinstruments.co.uk/instruments/impact-tester-charpy-izod-plastics/>  
(02.09.2024.)

Charpyjevo ispitivanje udarom je dinamičko ispitivanje u kojem se ispitni komad s U-zarezom ili V-zarezom u sredini lomi slobodnim padom bata koji udara točno u sredinu ispitnog uzorka sa suprotne strane zareza. Mjeri se apsorbirana energija koja je mjera udarne čvrstoće materijala, odnosno žilavosti. Ovaj postupak ispitivanja, koji je prihvaćen diljem svijeta, rutinski se koristi za specifikaciju čelika i osiguranje kvalitete.



Shematski prikaz Šarpijevog klatna

Sl.22 Shematski prikaz rada Charpy kidalice, Izvor: <https://ironlady003.wordpress.com/2013/10/02/dinamicka-ispitivanja-ispitivanje-zilavosti/> (02.09.2024.)

#### 4.2.5. Metalografsko ispitivanje

Metalografsko ispitivanje materijala se dijeli na makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje istoga. To je metoda s razaranjem materijala, kod koje se ispitni uzorak reže poprečno na os zavara te se promatra izložena površina. Ovaj oblik ispitivanja koristi se za određivanje kvalitete metala zavara i metalurške strukture zavara. Pripremljena površina ispitnog uzorka daje kontrast između zavara, zone utjecaja topline i osnovnog metala. Sve što je vezano uz makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva metalnih materijala propisano je normom HRN EN 1321.

Makroskopsko ispitivanje je oblik metalografskog ispitivanja u kojem se mikrostruktura gleda bez povećanja ili se koristi malo povećanje. Ova vrsta ispitivanja obično se izvodi korištenjem povećanja od 10 puta ili manje. Makroskopsko ispitivanje primjenjuje se za proučavanje strukture metala zavara, mjerenje dubine penetracije i otkrivanje prisutnosti troske, obloge elektrode, poroznosti i pukotina u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Nakon izrezanog komada ispitnog uzorka iz zavarenog spoja, potrebno je pripremiti površinu koja će se pregledavati kako bi se dobio dobar kontrast između zona zavara i prisutnih diskontinuiteta.

Sredstvo za nagrizanje se obično nanosi na sobnoj temperaturi mekom čistom krpom. Nagrizanje počinje čim se otopina nanese, nakon kratkog vremena vidljiv je kontrast između zona zavara. U nekim slučajevima potrebno je ponovno nanijeti sredstvo za nagrizanje ili ga utrljati u površinu dok ne bude jasno vidljiva struktura zavara. Nakon što je površina potpuno nagrizana, ispere se čistom vodom i osuši. Jednom očišćena površina uzorka ne smije se dodirivati niti na bilo koji način kontaminirati. Daleko potpunija slika o strukturi materijala dobiva se mikroskopskim ispitivanjem. U ovoj metodi metalografskog ispitivanja koriste se povećanja od preko 50 puta. Kao i kod makroskopskog ispitivanja, uzorci se odrezuju poprečno na os zavara, poliraju i čiste sredstvom za nagrizanje, no mikroskopi koji se koriste za pregledavanje uzoraka omogućavaju znatno veće povećanje. Mikroskopska ispitivanja omogućuju određivanje mikrostrukture, veličine zrna i njihove orijentacije te otkrivanje izrazito malih diskontinuiteta.

#### 4.3. Mikrostruktura zavarenog spoja

Metalografsko ispitivanje ključni je alat metode s razaranjem kod ispitivanju zavarenih



spojeva, kao alat za kontrolu procesa i kao kontrolu završnih komponenti zavara. Pukotine koje se mogu detektirati u grumenu zavara ili u zoni utjecaja topline opisuju se na temelju njihove lokacije, kao što su pukotine u obliku kratera, korijenske pukotine i pukotine u zoni utjecaja topline. Makrojetkani konstrukcijski čelici s niskim udjelom ugljika zavareni su koristeći bilo različite atmosfere zaštitnog plina ili različite unose topline, što pokazuje utjecaj ovih varijabli na oblik zavarenog zrnca, dubinu prodiranja zavara i dubinu zona pod utjecajem topline. Ispitivanje zavarenog spoja zahtijeva izrezivanje jednog ili više uzoraka za uzorkovanje strukture zavara, zone utjecaja topline i susjednog osnovnog metala. Polirani uzorak, kada se nagriza prikladnim reagensom za leguru, otkriva i makrostrukturu i mikrostrukturu.

Od metalografa se često traži da ispituju zavarene spojnice. Za to je potrebno izrezati jedan ili više uzoraka uzorak strukture zavara, zone utjecaja topline i susjedni osnovni metal. Povoljno je ako mogu sve tri zone biti sadržan u jednom primjerku. U većini slučajeva, zavari su dovoljno mali da se to lako izvede. Kod većih zavara je teško u jednoj eprueti imati sve tri zone, pa je potrebno izraditi tri epruete.

Već spomenuta norma HRN EN 1321 propisuje i sadrži sve što je vezano uz makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva metalnih materijala. Norma propisuje način pripreme uzoraka, postupak ispitivanja te glavni cilj ispitivanja. Za analizu zavarenih spojeva metalografski uzorci izrađuju se klasičnim postupcima pripreme: izrezivanjem, ulijevanjem u masu, brušenjem, poliranjem te nagrivanjem površine.

Makroskopskom i mikroskopskom analizom otkrivaju se makroskopske i mikroskopske značajke zavarenog spoja, najčešće uzetog iz ravnine okomite na smjer zavarivanja.

Značajke koje se vrednuju:

1. tople pukotine
2. hladne pukotine
3. uzdužne pukotine
4. šupljine, pore
5. uključci
6. nedovoljni provar
7. geometrijski oblik
8. zona utjecaja topline
9. slojevi i prolazi
10. granice zrna
11. struktura zrna

12. solidifikacija strukture
13. priprema zavara
14. usmjerenost strukture
15. segregacije
16. precipitati

## 5. TEHNOLOGIJA ISPITIVANJA BEŠAVNIH CIJEVI

Tehnologija ispitivanja zavara na zavarenim bešavnim cijevima se sastoji od ispitivanja zavarenog spoja na ispitnim uzorcima zavarenih različitim metodama zavarivanja.

Samo ispitivanje se vrši u radionici za cjevarsku obradu.

Tehnologija predviđa pripremu po fazama:

- određivanje dimenzije ispitnog uzorka, određivanje materijala ispitnog uzorka, te osiguranje uređaja i alata u pogonu gdje će se vršiti ispitivanje
- određivanje postupka zavarivanja i radnih parametara
- određivanje postupka ispitivanja uzorka, vršenje samog postupka, te registriranje rezultata ispitivanja uzorka.

Priprema uzoraka obuhvaća:

- rezanje cijevi na dužinu 200 mm (6 uzorka – po dva se međusobno zavare različitom metodom zavarivanja, REL, TIG i MIG/MAG –CO<sub>2</sub>)
- završetke cijevi obraditi prema normi ISO 2553 (kut 30<sup>0</sup>),
- mehanički i kemijski očistiti i odmastiti uzorke

Pripreme se tri iste cijevi, pa se vrši točkasto zavarivanje REL , TIG i CO<sub>2</sub> postupkom. Zatim se izvrši zavarivanje cijelog opsega cijevi. Prethodno se izrade se tri čepa, kao pomoćna sredstva. Vanjski promjer čepova odgovara unutrašnjem promjeru bešavnih cijevi i montiraju se na jedan kraj svakog uzorka. Zavare se i odbruse se bridovi na zavarenom dijelu. Ta predradnja je potrebna da ne dođe do deformacije uzoraka kod zavarivanja i ispitivanja. Odredi se jedna cijev s oznakom 1. I druga cijev s oznakom 2 i treća cijev s oznakom 3. Cijev s oznakom 1. se zavari s drugom cijevi TIG postupkom. Cijev s oznakom 2. na isti način, REL postupkom, a cijev oznake 3. Metodom CO<sub>2</sub>. Kako je 6 uzorka, po dva se zavaruju i dobiva se uzorak-eprueta za ispitivanje zavara. Nakon zavarivanja i ohlađivanja, prilazi se inspekciji zavara. Prethodno se zavari očiste čeličnom četkom. Prvo se zavari pregledaju vizualno, kontrolira se izgled i geometrija zavara. Traže se moguće vizualne greške zavara.



Sl.22 Kidalica za vlačna naprezanja, Izvor: <https://www.ispitivanje.com/staticke-kidalice-inspekt-duo/>  
(02.09.2024.)

Kod primjene tehnologije ispitivanje, proba na vlak je temeljni postupak za mehaničke osobine. Vršiti se na kidalici za vlačna ispitivanja. Prvo se uzorak 1. stavi u čeljusti kidalice. Uređaj se uključi, čeljusti počinju vlačno razvlačiti uzorak. U momentu kidanja materijala, istezanje je završeno. Rezultati se bilježe i pripremaju za analizu. Postupak se ponavlja i s uzorkom 2. I 3. Kod momenta loma, prekida se ispitivanje i rezultati se bilježe. To se naziva Izvješće o mehaničkom ispitivanju.

Po završetku mehaničkog ispitivanja na vlak, zavari se ponovo vizualno pregledaju, radi utvrđivanja nedostataka i mogućih pukotina. Rezultati su dobri i prihvatljivi kada u trenutku kidanja, mehaničke karakteristike zavara su iste s mehaničkim karakteristikama bešavne cijevi.

Na slici su prikazane bešavne cijevi, primjer označavanja cijevi npr: ST37.4, E235+N, EN 10305-1.



Sl.23 Bešavne cijevi, Izvor: <https://strojopromet.com/cijevi-okrugle-hladno-vucene-precizne-besavne/>  
(09.09.2024.)

Na slici su prikazane dimenzije bešavnih cijevi. Recimo bešavne cijevi od ugljičnog čelika DIN 1630 Grade St 37-4 također su poznate kao cijevi i cijevi od mekog čelika. Cijevi DIN 1630 Grade St 37-4 su jeftine cijevi od niskougljičnog čelika s maksimalnim udjelom ugljika od 0,17 % s kombinacijom min. 0,35 % mangan lako se oblikuje i oblikuje. Ove se cijevi proizvode prema DIN specifikaciji i komercijalno nazivaju cs cijevima ili ms cijevima. Čelične cijevi s niskim udjelom ugljika nisu tako tvrde kao cijevi od visokougljičnog čelika, iako pougljičenje može povećati površinsku tvrdoću. Cijevi DIN 1630 Grade St 37-4 koriste se uglavnom za automobilske sektore, unutarnje i vanjske arhitektonske strukture, vodovodne vodove, plinske vodove, industriju nafte i plina itd. Cijevi od E235N zavarljive su prema uobičajenoj tehnologiji niqes. Prikladni su tipovi izrađeni od 1.4571 (nerđajućeg čelika). za elektrolučno zavarivanje. Treba odabrati punilo za zavarivanje u skladu s DIN EN 1600 i DIN EN 12072 dio 1 uzimajući u obzir vrstu primjene i zavar- vanje tehnike.

#### Cijevi Okrugle Hladno vučene, precizne, bešavne

| Vanjski<br>dijametar | 1,5   | 2,0   | 2,5   | 3,0   | 3,5   | 4,0   | 4,5   | 5,0   | 6,0   |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6                    | 0,240 | 0,296 |       |       |       |       |       |       |       |
| 8                    | 0,314 | 0,395 | 0,339 | 0,370 |       |       |       |       |       |
| 10                   | 0,388 | 0,493 | 0,462 | 0,518 |       |       |       |       |       |
| 12                   | 0,462 | 0,592 | 0,586 | 0,666 | 0,734 |       |       |       |       |
| 14                   | 0,499 | 0,641 | 0,709 | 0,814 | 0,906 | 0,986 | 1,054 |       |       |
| 15                   | 0,536 | 0,691 | 0,771 | 0,888 | 0,993 | 1,085 | 1,165 |       |       |
| 16                   | 0,610 | 0,789 | 0,832 | 0,962 | 1,079 | 1,184 | 1,276 |       |       |
| 18                   | 0,648 | 0,888 | 0,956 | 1,110 | 1,525 | 1,381 | 1,498 |       |       |
| 20                   | 0,758 | 0,986 | 1,079 | 1,258 | 1,424 | 1,578 | 1,720 | 1,850 | 2,071 |

Sl.24 Prikaz bešavnih cijevi okrugle, hladno vučene i precizne, Izvor:<https://strojopromet.com/cijevi-okrugle-hladno-vucene-precizne-besavne/> (09.09.2024.)

DIN1630 St 37.4 bešavne čelične cijevi gornje granice naprezanja za konstruktivnu temperaturu

| Klasa čelika        |                 | Gornje naprezanje tečenja za konstruktivnu temperaturu |             |             |         |             |             |         |             |             |         |     |             |
|---------------------|-----------------|--|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|-----|-------------|
| Simbol              | Broj materijala | 50 ° C   |             |             | 200 ° C |             |             | 250 ° C |             |             | 300 ° C |     |             |
|                     |                 | i debljinu stijenke                                    |             |             |         |             |             |         |             |             |         |     |             |
|                     |                 | ≤16  | > 16<br>≤40 | > 40<br>≤65 | ≤16     | > 16<br>≤40 | > 40<br>≤65 | ≤16     | > 16<br>≤40 | > 40<br>≤65 | ≤16     | ≤16 | > 40<br>≤65 |
| N / mm <sup>2</sup> |                 |  |             |             |         |             |             |         |             |             |         |     |             |
| St 37.4             | 1.0255          | 235  | 225         | 215         | 185     | 175         | 170         | 165     | 155         | 150         | 140     | 135 | 130         |

Sl.25 Definiranje veličine i klase čelika St 37.4 <https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)

| Kemijski sastav |                 |  |                          |      |             |       |       |  |  |
|-----------------|-----------------|--|--------------------------|------|-------------|-------|-------|--|--|
| Klasa čelika    |                 | Vrsta deoksidacije<br>(RR.potpuno<br>ubijen) | Kemijski sastav, maseni% |      |             |       |       | Dodatak elemenata za<br>učvršćivanje dušika (npr.<br>Manje od 0,020% Al) |  |
| Simbol          | Broj materijala |  | C                        | Si   | Mn          | Str   | S     |  |  |
|                 |                 |  | maks                     |      |             | maks  |       |  |  |
| St 37.4         | 1.0255          | RR   | 0.17                     | 0.35 | > =<br>0,35 | 0.040 | 0.040 | Da   |  |

Sl.26 Kemijski sastav čelika 37.4, Izvor:<https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)

DIN1630 St 37.4 mehanička svojstva bešavnih čeličnih cijevi

| Klasa čelika |                 | Gornje naprezanje tečenja Reh za debljinu stijenke u mm |       |       | Vlačna čvrstoća<br>Rm N / mm <sup>2</sup> | Istezanje nakon loma A5 |          | Udarne energija ISO V-obrazni ispitni komadi na + 20 ° C |          |
|--------------|-----------------|---|-------|-------|---|-------------------------|----------|--|----------|
| Simbol       | Broj materijala | Do 16   | 16-40 | 40-65 |   | uzdužni                 | poprečni | uzdužni  | poprečni |
|              |                 | N / mm <sup>2</sup> min                                 |       |       |   | % min                   |          | / min  |          |
| St 37.4      | 1.0255          | 235   | 225   | 215   | 350 do<br>480                             | 25                      | 23       | 43   | 27       |

Sl.27 Mehanička svojstva čelika, Izvor :<https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)

Kao primjer iz kataloga Zika-welding mogu se odabrati elektrode za zavarivanje: [https://www.zika-welding.com/wp-content/uploads/2015/12/Technical\\_Guide\\_Small-English.pdf](https://www.zika-welding.com/wp-content/uploads/2015/12/Technical_Guide_Small-English.pdf) te se kao primjer može uzeti elektroda Z-610 koja odgovara specifikaciji EN ISO: 2560-A

Opis i primjena: • Elektroda s celuloznim premazom za cijevi i općenito zavarivanje istosmjernom strujom • Omogućuje duboko prodiranje luka za zavarivanje korijena i visoko kvaliteta radiografskog ispitivanja • Prikladno za zavarivanje cijevi, tlačnih posuda, spremnici, brod

### Welding position

|          |    |    |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|----|----|
|          |    |    |    |    |    |    |
| ASME:    | 1G | 2F | 2G | 3G | 3G | 4G |
| ISO 6947 | PA | PB | PC | PF | PG | PE |

### Materials to be welded

|                                   |            |                        |
|-----------------------------------|------------|------------------------|
| Unalloyed construction steels     | DIN 17 100 | ST 33                  |
| Boiler and pressure vessel steels | DIN 17 155 | HI, HII                |
| Pipe steels                       | DIN 17 172 | StE 210.7 to StE 415.7 |
|                                   | DIN 17 175 | St 35.8 to St 45.8     |
|                                   | DIN 1629   | St 35 to St 52.4       |
|                                   | API 5L     | X42 to X63             |
| Fine grained steels               | DIN 17 102 | StE 255 to StE 355     |
| Shipbuilding steels               |            | A,B,D                  |

|      | Dia  |    | Length |         | Current (amps) | Weight kg/100 pcs | Weight      |             |
|------|------|----|--------|---------|----------------|-------------------|-------------|-------------|
|      | in   | mm | in     | mm      |                |                   | packet (kg) | carton (kg) |
| 3/32 | 2.5  | 14 | 350    | 60-90   | 1.8            | 5.0               | 15.0        |             |
| 1/8  | 3.25 | 14 | 350    | 80-125  | 2.9            | 5.0               | 15.0        |             |
| 5/32 | 4.0  | 14 | 350    | 120-180 | 4.3            | 5.0               | 15.0        |             |
| 3/16 | 5.0  | 14 | 350    | 160-230 | 6.6            | 5.0               | 15.0        |             |
| 1/4  | 6.0  | 14 | 350    | 220-280 | 9.5            | 5.0               | 15.0        |             |

Sl.28 Karakteristike elektrode Z-610 prema EN ISO: 2560-A, Izvor: [https://www.zika-welding.com/wp-content/uploads/2015/12/Technical\\_Guide\\_Small-English.pdf](https://www.zika-welding.com/wp-content/uploads/2015/12/Technical_Guide_Small-English.pdf) (09.09.2024.)

## 6. ZAKLJUČAK

Zaključak rada pokazuje da bešavne cijevi imaju široku primjenu u metalnim konstrukcijama, pri čemu je zavarivanje od ključne važnosti. Tehnologija zavarivanja i ispitivanja zavara igra presudnu ulogu u osiguravanju kvalitete i sigurnosti bešavnih cijevi. S obzirom na prikazane metode, ispitivanje zavara preporučuje se provoditi pomoću tri glavne metode: REL (ručno elektrolučno), TIG (zavarivanje u inertnoj atmosferi s netrošećom elektrodom) i MIG/MAG (zavarivanje u atmosferi CO<sub>2</sub>). U radu je prikazan pregled najvažnijih postupaka zavarivanja, uključujući njihove prednosti i nedostatke, koji utječu na kvalitetu zavarenih spojeva bešavnih cijevi. Potvrđena je početna hipoteza da optimalni uvjeti korištenja zahtijevaju pažljiv odabir postupka zavarivanja te da pravilna izvedba utječe na kvalitetu zavarenih spojeva. Zavarivanje danas ima široku primjenu u različitim gospodarskim sektorima. Analize postupaka zavarivanja i ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva značajno doprinose optimizaciji i unaprjeđenju tehnologije zavarivanja s tehnološkog i ekonomskog aspekta.

**POPIS LITERATURE**

1. Dr.MojtabaMahmoodian, inReliabilityandMaintainabilityofIn-Service Pipelines, 2018
2. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/seamless-pipe> (08.08.2024.)
3. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/the-manual-metal-arc-process-mma-welding-002> (08.08.2024.)
4. [https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads\\_nastava/20180302\\_095155\\_bernecic\\_ZAVARIVANJE.2015.pdf](https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180302_095155_bernecic_ZAVARIVANJE.2015.pdf) (10.08.2024.)
5. <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/mig-welding-the-basics-for-mild-steel> (10.08.2024.)
6. <https://www.uti.edu/blog/welding/gmaw-mag-welding> (08.08.2024.)
7. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/tungsten-inert-gas-tig-or-gta-welding-006> (01.08.2024.)
8. [https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi\\_2013/Vera-Rede-Danko-Coric-Jurica-Radic.pdf](https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2013/Vera-Rede-Danko-Coric-Jurica-Radic.pdf) (01.08.2024.)



## POPIS SLIKA

Sl.1 Bešavne cijevi, Izvor <https://www.weylanland.hr/proizvodi/cijevi> (26.08.24.)

Sl.2 Poprečni presjek cijevi, Izvor <https://hr.wikipedia.org/wiki/Cijev> (26.08.24.)

Sl.3 Tablica dimenzija, Izvor <https://hr.yzpipes.com/info/steel-pipe-dimensions-sizes-chart-40-schedule-75586491.html> (26.08.2024.)

Sl.4 Shematski prikaz proizvodnje bešavnih cijevi, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.5 Elektronski tok, Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno\\_elektrolu%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)  
(26.08.2024.)

Sl.6 Shematski prikaz REL zavarivanja, Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno\\_elektrolu%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)  
(26.08.2024.)

Sl.7 MIG/MAG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.8 Shematski prikaz uređaja za MIG/MAG zavarivanje, Izvor: <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja> (26.08.2024.)

Sl.9 TIG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.10 TIG zavarivanje, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.11 Ispitivanje magnetskom metodom, Izvor: Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.12 Ispitivanje zavara ultrazvučnom metodom, Izvor: <http://pondt.hr/paut-ultrazvucno-ispitivanje-visepretvornickom-tehnikom/> (02.09,2024.)

Sl.13 Ispitivanje zavara penetrantima, Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko\\_ispitivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko_ispitivanje) (02.09.2024.)

Sl.14 Radiografska metoda ispitivanja zavara, Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska\\_kontrola](https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska_kontrola) (02.09.2024.)

Sl.15 Hookov dijagram, Izvor: Obrada autora

Sl.16 Plosnata eprueta EN 895, Izvor: : Predavanja nastavnika Dario Bognolo 2023-24

Sl.17 Okrugla eprueta EN 876 kroz faze razvlačenja, a) ispitna epruveta, b) deformacije epruvete kod rastezanja, c) pojava vrata na epruveti, Izvor:

[https://sfsb.unisb.hr/ksk/statika/cvrstoca/web\\_cvrstoca/E\\_ovisnost\\_napdef/a\\_veza\\_napr\\_def/E\\_s\\_67\\_1.htm](https://sfsb.unisb.hr/ksk/statika/cvrstoca/web_cvrstoca/E_ovisnost_napdef/a_veza_napr_def/E_s_67_1.htm) (02.09.2024.)

Sl.18. Ispitivanje savijanjem(I i II faza), Izvor:

<https://ironlady003.wordpress.com/2013/10/03/tehnoloska-ispitivanja/> (02.09.2024.)

Sl.19 Shematski prikaz Vickersove metode, Izvor

<https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a> (02.09.2024.)

Sl.20 Shematski prikaz Brinellove metode, Izvor

<https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a> (02.09.2024.)

Sl.21 Charpy kidalica, Izvor: <https://amlinstruments.co.uk/instruments/impact-tester-charpy-izod-plastics/> (02.09.2024.)

Sl.22 Kidalica za vlačna naprezanja, Izvor: <https://www.ispitivanje.com/staticke-kidalice-inspekt-duo/> (02.09.2024.)

Sl.23 Bešavne cijevi, Izvor: <https://strojopromet.com/cijevi-okrugle-hladno-vucene-precizne-besavne/> (09.09.2024.)

Sl.24 Prikaz bešavnih cijevi okrugle, hladno vučene i precizne,

Izvor: <https://strojopromet.com/cijevi-okrugle-hladno-vucene-precizne-besavne/> (09.09.2024.)

Sl.25 Definiranje veličine i klase čelika St 37.4 <https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)

Sl.26 Kemijski sastav čelika 37.4, Izvor <https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)

Sl.27 Mehanička svojstva čelika, Izvor : <https://hr.emilymetal.com/st37-4-en10305-seamless-steel-tubes-hydraulic-tube-honed-steel-pipe-automotive.html> (09.09.2024.)