

# ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MJ.20-SI.71

---

Jurčić, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:871066>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MJ.20-SI.71**

RIJEKA, rujan 2022.

Marin Jurčić

0069059072

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MJ.20-SI.71**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

## **IZJAVA O AUTENTIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA I ZAHVALE**

Ovaj sam završni rad izradio samostalno uz mentoriranje i podršku profesora Daria Iljića, te primjenom znanja stečenih za vrijeme studiranja na tehničkom fakultetu (uglavnom) na kolegijima Materijali 1, Zavarivanje, Konstrukcijski Elementi 1 i Nauka o čvrstoći.

Osim svom mentoru i profesorima spomenutih kolegija posebna zahvala ide kolegi Lorenu Leskovaru koji je mi je bio nezamisliva podrška i pomoć za vrijeme studiranja, te me je svojom upornosti i dobrom voljom motivirao da završim studiranje. Osim ogromne zahvalnosti želim mu svu sreću u životu. Posljednja zahvala ide mojim prijateljima i poslodavcima - studiju Yan Kamov na susretljivosti pisanja završnog rada za vrijeme radnog vremena.

## **SADRŽAJ**

|   |          |
|---|----------|
| <b>IZJAVA O AUTENTIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA I ZAHVALE</b> | <b>2</b> |
| <b>SADRŽAJ</b>  | <b>3</b> |
| <b>1. UVOD</b>  | <b>1</b> |
| <b>2. METALURGIJA ZAVARIVANJA</b>                     | <b>2</b> |
| 2.1. Zavarljivost                                     | 2        |
| 2.2. Zakaljivost                                      | 3        |
| 2.3. Prokaljivost                                     | 3        |
| 2.4. Električni luk                                   | 3        |
| 2.5. Struktura zavarenog spoja                        | 5        |
| 2.5.1. Zona utjecaja topline                          | 5        |
| 2.5.2. Zona taljenja                                  | 6        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. PRIPREMA METALA PRED ZAVARIVANJE</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1. Utjecaji na proces zavarivanja  | 7         |
| 3.2. Određivanje tipa zavarenog spoja  | 7         |
| 3.3. Odabir i priprema žlijeba   | 8         |
| 3.4. Definiranje redoslijeda zavara  | 9         |
| <b>4. NAJRAŠIRENIJI POSTUPCI ZAVARIVANJA</b>   | <b>10</b> |
| 4.1. Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog ili aktivnog plina (MIG/MAG) | 10        |
| 4.1.1. Opis načina rada  | 10        |
| 4.1.2. Prednosti i nedostaci   | 11        |
| 4.2. Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG)                  | 12        |
| 4.2.1. Opis načina rada  | 12        |
| 4.2.2. Prednosti i nedostaci   | 13        |
| 4.3. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL)  | 14        |
| 4.3.1. Opis načina rada  | 14        |
| 4.3.2. Prednosti i nedostaci   | 15        |
| <b>5. POGREŠKE PRI ZAVARIVANJU</b>   | <b>16</b> |
| 5.1. Najčešće greške na zavarenom spoju  | 17        |
| 5.1.1. Pukotine  | 17        |
| 5.1.2. Poroznosti  | 18        |
| 5.1.3. Uključine   | 19        |
| 5.1.4. Nedovoljno protaljivanje  | 20        |
| 5.1.5. Nepravilnost oblika   | 21        |
| <b>6. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA</b>  | <b>22</b> |
| 6.1. Kvaliteta zavarenog spoja   | 22        |
| 6.2. Ispitivanje bez razaranja   | 23        |
| 6.2.1. Vizualna inspekcija   | 23        |
| 6.2.2. Provjera neporpusnosti  | 23        |
| 6.2.3. Provjera radiografskim ili rendgenskim snimanjem  | 23        |
| 6.2.4. Provjera magnetskim metodama  | 24        |
| 6.2.6. Provjera ultrazvučnom metodom   | 25        |
| 6.3. Ispitivanje sa razaranjem   | 26        |
| 6.3.1. Ispitivanje udarnog loma  | 26        |
| 6.3.2. Ispitivanje tvrdoće   | 27        |
| 6.3.3. Makroskopsko ispitivanje  | 27        |
| 6.3.4. Mikroskopsko ispitivanje  | 28        |
| 6.3.5. Test savijanja  | 28        |
| 6.3.6. Test vlačne čvrstoće  | 30        |
| <b>7. ISPITIVANJA STROJNOG DIJELA MJ.20-SI.71</b>  | <b>32</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 7.1. Opis predmeta ispitivanja - strojnog dijela MJ.20-SI.71 | 32        |
| 7.2. Test savijanja  | 33        |
| 7.2.1. Priprema uzorka za savijanje i test                   | 33        |
| 7.2.2. Rezultati testiranja strojnog dijela MJ.20-SI.71      | 34        |
| 7.3. Test vlačne čvrstoće                                    | 37        |
| 7.3.1. Provedba testa vlačne čvrstoće                        | 37        |
| 7.3.2. Rezultati testiranja strojnog dijela MJ.20-SI.71      | 38        |
| <b>8. ZAKLJUČAK</b>  | <b>40</b> |
| <b>Sažetak</b>   | <b>42</b> |
| <b>Summary</b>   | <b>43</b> |
| <b>Literatura</b>  | <b>44</b> |
| <b>Popis slika</b>   | <b>45</b> |

## 1. UVOD

Tema ovog završnog rada je ispitivanje strojnog dijela MJ .20-SI.71, te detaljna analiza rezultata ispitivanja, kao i samih teorijskih osnova metoda ispitivanja. Kako je primarno riječ o kvaliteti zavara, u ovom ću radu dati i teorijske osnove kako metoda ispitivanja i detalja o stroju na kojem se ispitivanje provodi, te o nauci zavarivanja općenito. Ispitivanje materijala i kvalitete zavara je iznimne važnosti, sve su današnje metode ispitivanja standardizirane, a zavarene konstrukcije dolaze sa tvorničkim certifikatima koje jamče kvalitetu odrađenog posla. Certifikate kvalitete mora imati svaka zavarionica (kao tvrtka) i svaki zavarioc (kao profesionalni radnik). Ovaj rad proći će i sve relevantne metode ispitivanja sa fokusom na testiranje sučeono "V" zavara na zavarenoj čeličnoj ploči. Dati ću i poseban osvrt na druge metode zavarivanja i ispitivanja zavarenih spojeva.

Ovaj je završni rad podjeljen u 8 poglavlja kroz koja ću objasniti načine ispitivanja, detaljno opisati postupak pripreme metala za zavarivanje), same načine zavarivanja (poglavlje 4), utjecaj zavarivanja na obradak. Šesto se poglavlja bavi samim postupcima ispitivanja materijala, dok ću u sedmom poglavlju objasniti predmet ispitivanja i uzorke za svako testiranje, kao i predložiti rezultate ispitivanja na meni dodjeljenom uzorku. U osmom poglavlju donijeti ću zaključak.



## 2. METALURGIJA ZAVARIVANJA

Kao što je to vrlo dobro oebjasnio profesor Pavletić na svojem predavanju (kolegij Zavarivanje):

*“Zavarivanje podrazumijeva proces dobivanja nerastavljivog spoja, uz lokalno ili šire zagrijavanje sastavljenih dijelova odnosno plastičnim deformiranjem ili, pak, istodobnim djelovanjem jednoga i drugoga.” [1]*

Iako postoje brojne metode postizanja zavarenog spoja, najčešći problem kod zavarivanja je odabir najboljeg rješenja spajanja dva metala u zavareni spoj. Polazišna točka zavarivanja je definiranje zavarene konstrukcije. Kad definiramo zavarenu konstrukciju moramo uzeti u obzir varijable kao što su dimenzije i vrste zavarenih spojeva, tehniku polaganja zavara, temperaturu predgrijavanja spoja, napon tj. dužinu električnog luka, vrstu i promjer elektroda, jakost struje zavarivanja i njen polaritet, najoptimalniju tehniku polaganja zavara, te moguće postupke zavarivanja. Prije samog izvođenja zavarivanja nužno je osigurati sigurnu okolinu za zavarivanje - potrebno je uzeti u obzir i preventirati moguće opasnosti kojima će zavarioc biti izložen kao što su ultraljubičasto i infracrveno zračenje, električni udari, eksplozije, požari i strujni udari. Isto je tako potrebno preventirati moguća onečišćenja zavarenog spoja. U nastavku iznjeti ću osnovne pojmove zavarivanja:

### 2.1. Zavarljivost

Zavarljivost nije fizička karakteristika metala, već je karakteristika koja nam opisuje razinu podudarnosti osnovnog metala sa zavarenim spojevima. Definira ju postupak zavarivanja, te sastav osnovnog i dodatnog metala, satav praška, zaštićenog plina ili obloge elektrode, tip zavarenog spoja i sami uvjeti korištenja radnog komada. Ako je neki metal karakterizira dobra zavarljivost, zavareni spoj imati će istu (ili približnu) čvrstoću kao osnovni metal, te neće biti pukotina metala u šavu, uz postojanu plastičnost u zoni zavarivanja oko šava. Loša zavarljivost materijala znači da bi za postizanje zavarenog spoja trebali koristiti posebne tehnologije i metode zavarivanja kao što su predgrijavanje, zavarivanje u vakuumu, olaganje stranica žlijeba).

Zavarivanje metala i legura loše zavarljivosti definirano je normama koje se moraju ispoštovati. [2] Prije zavarivanja, zavarljivost metala ocjenjuje se različitim testiranjima, dobiveni se rezultati uspoređuju sa propisanim vrijednostima pojedinih karakteristika. Ako one odgovaraju propisanim vrijednostima definiranim normativima metali se mogu koristiti za zavarivanje. Odabir tesotva, tj. metode ispitivanja ne ovisi samo o karakteristikama osnovnog metala, već i ovisi o namjeni konstrukcije. Najčešće metode ispitivanja su ispitivanje otpornosti metala šava i zone oko šava na tople pukotine i prijelaz u krto stanje, te ispitivanje mehaničkih osobina zavarenog spoja pri različitim temperaturama. Tehnološka zavarljivost definira zavarljivost konstrukcijskog dijela, a određuju ju dimenzije konstrukcije, uvjeti rada, raspored zavarenih spojeva i njena namjena, te mogućnost izvođenja.

## **2.2. Zakaljivost**

Zakaljivost je maksimalna tvrdoća koju čelik dobije nakon kaljenja. Zakaljivost uvelike ovisi o sadržaju ugljika u čeliku, njena se vrijednost izražava u HRC. Povećavanje sadržaja ugljika nakon 0,7% značajno ne povećava tvrdoću.

## **2.3. Prokaljivost**

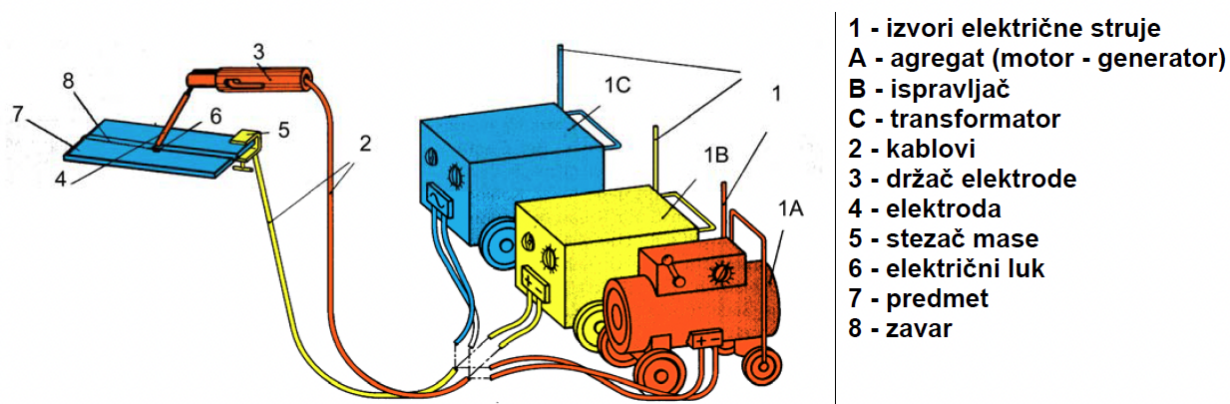
Prokaljivost je mjera za dubinu prodiranja zakaljene zone, ona ovisi o kritičnoj brzini kaljenja. Dok se čelik kali, spomenuta je brzina hlađenja maksimalna na površini, a minimalna u jezgri. Kada je brzina kaljenja manja od brzine hlađenja jezgre, onda se čelik prokaljuje kroz cijeli presjek, stoga je prokaljivost veća što je kritična brzina kaljenja manja.

## **2.4. Električni luk**

Električni luk je električni proboj plina, koji posljedično stvara plazme i električnu provodljivost plina ili zraka, koji su u normalnim uvjetima izolatori. Za formiranje električnog luka potrebni su manji naponi nego kod "tinjanja" kod tinjalica i katodnih cijevi. Kako bi ga uspješno formirali potrebne su nam dvije elektrode (obično od volframa ili ugljika) između kojih prolazi neki plin, pri njegovom formiranju dolazi do stvaranja izuzetno visokih temperatura.

Možemo ga uspostaviti na tri načina - kratkim spajanjem, visokonaponskim impulsima i pomoćnim električnim lukom. Karakteriziraju ga duljima, tolpinia i napon oko kojeg se stvara magnetsko polje.

Električni je luk zapravo stalno pražnjenje elektroda, dok trenutno pražnjenje karakterizira pojava iskrenja. Moguće ga je uspostaviti i kod istosmjerne i izmjenične struje. Karakteriziraju ga visoke temperature, velika gustoća struje, te jaka fotoelektronska i termoelektronska emisija - baš zbog ovih karakteristika koristi se kao jedan od najčešćih alata pri zavarivanju. Osim tradicionalnog i standardnog zavarivanja koristi se i za rezanje, te za posebne oblike taljenja i generatora plazme. Električni luk pretvara električnu u toplinsku energiju. Kod zavarivanja taljenjem, toplina električnog luka mora biti dovoljna da omogući taljenje osnovnog i nekad dodatnog metala. Temperature električnog luka su u rasponu od 4 000 °C do 6000 °C, dok nam planiski plamen omogućuje temperature od 2000 °C do 3500 °C [2] . Prema vrsti struje zavarivanja razlikujemo električni luk istosmjerne i izmjenične struje, te pulsirajući električni luk. Detaljnu primjenu i karakteristike električnih lukova, te njihove uloge u specifičnim načinima zavarivanja objasniti ću u daljnjim poglavljima. Slika ispod pokazuje jedan primjer električnog luka koji se koristi za ručno-elektrolučno zavarivanje. U narednim ću poglavljima pobliže objasniti svaki glavni način zavarivanja.



Slika 2.1. Potrebna oprema za formiranje električnog luka pri ručno-elektrolučnom zavarivanju

## 2.5. Struktura zavarenog spoja

Struktura zavarenog spoja podjeljena je u 3 karakteristične zone - zonu taljenja, zonu utjecaja topline (ZUT), te zonu nepromijenjenog osnovnog metala. [1]

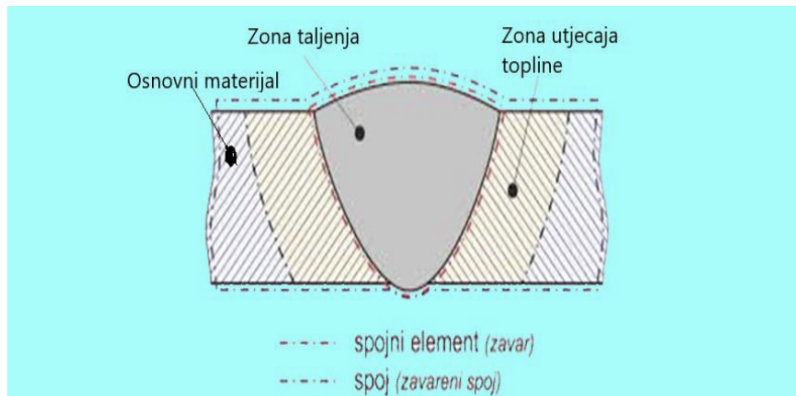
Zona taljenja je dio zavarenog spoja koji određuju granice taljenja u kojima se je osnovni metal u potpunosti rastalio (uz udio rastaljenog dodatnog materijala). U ovoj se zoni dostižu najviše temperature, te hlađenje metala najdulje traje. Sama metalurška struktura najviše ovisi o kvaliteti i načinu odrađivanja zavarivanja. Ova se zona uglavnom sastoji od krupnih zrna. Porast veličine zrna nije samo zbog temperature, već i načina odvođenja topline.

### 2.5.1. Zona utjecaja topline

Zona utjecaja topline (ZUT) nalazi se u rubnim dijelovima (iznad granice taljenja), u toj zoni (zbog utjecaja topline) dolazi do značajnih promjena strukture osnovnog metala, koje posljedično utječu na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Samu zonu utjecaja topline možemo podijeliti u, isto je prikazano na slici 2.2.:

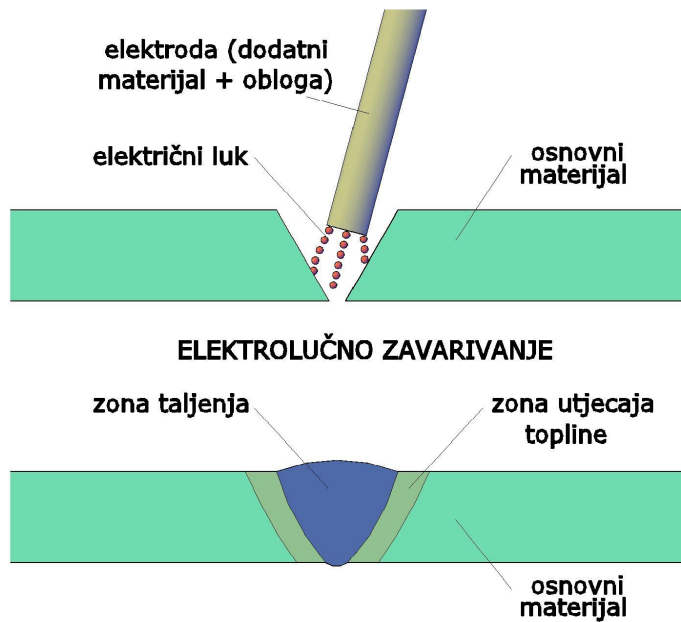
1. Područje predgrijavanja - nalazi se neposredno uz granicu taljenja i sastoji se od uglavnom krupnih zrna. Opisuju ju smanjena elastičnost i udarna žilavost.
2. Područje normaliziranja - sastoji se od sitnijih zrna i ima poboljšana mehanička svojstva
3. Područje djelomičnog prekrizaliziranja - u ovom se području pojavljuju tvrda mjesta kao i loša mehanička svojstva.



Slika 2.2. Promjena strukture zavara porastom temperature

### 2.5.2. Zona taljenja

Prijelazna zona je područje u zavaru u kojoj dolazi do strukturnih promjena. Ona se određuje pomoću udaljenosti od centra zavara i maksimalne temperature koju postiže određena točka zavara. U ovoj se zoni dosežu najviše temperature, te hlađenje metala najviše traje. U ovoj se zoni najčešće nalaze krupna zrna, kao što je prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3. Prikaz zone utjecaja topline

### **3. PRIPREMA METALA PRED ZAVARIVANJE**

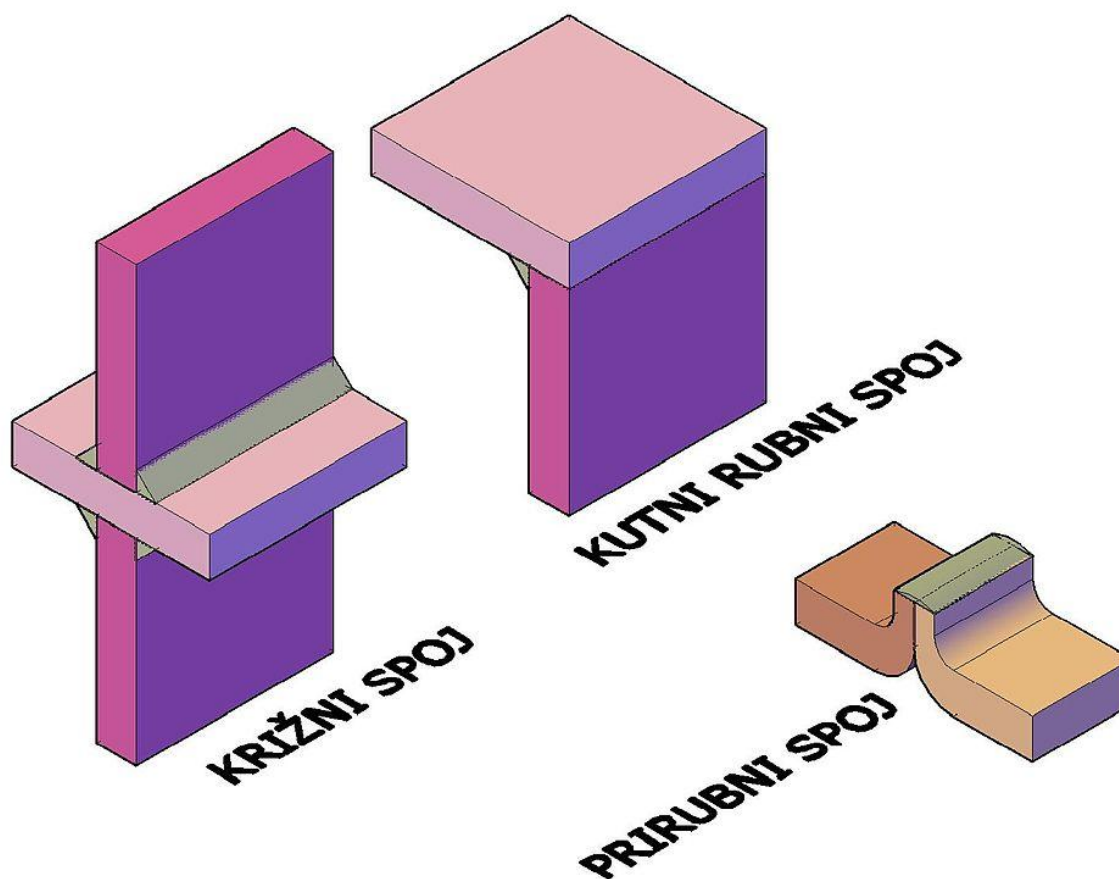
Kako bi kvaliteta zavarenog spoja bila osigurana, potrebno je poštovati određena pravila projektiranja i izraditi plan zavarivanja u skladu sa ahtjevima projekta. To se odnosi na odabir metala, načina zavarivanja i osnovne parametre zavarivanja (oblik i dimenzije pripreme spoja). Na kraju definiramo redoslijed polaganja zavara.

#### **3.1. Utjecaji na proces zavarivanja**

Na sam proces zavarivanja (nastajanja zavarenog spoja) utječu mnogi faktori kao što su dovođenje i odvođenje topline, jakost struje i brzine zavarivanja, sama zaštita osnovnog i dodatnog metala, značajke dodatnog i osnovnog metala, plinovi iz atmosfere koji ulaze u rastaljeni metal, te količina i oblik kojim se prenosi rastaljeni metal. Nepovoljne reakcije sa kisikom, vodikom ili dušikom negativno utječu na mehanička svojstva zavarenog spoja, te omogućuju pojavu pukotina.

#### **3.2. Određivanje tipa zavarenog spoja**

Postoji puno standardiziranih tipova zavarenog spoja, u praksi najčešće se koriste kutni, preklopni, sučeljni, kružni, kutni rubni i prirubni spoj. Odabir tipa zavarenog spoja ovisi o debljini komada koji se zavaruju, pristupačnosti i položaju zavarivanja, vrsti osnovnog metala i kriterijima kvalitete zavarene površine. Neki od tipova zavarenih spojeva prikazani su na slici 3.1.

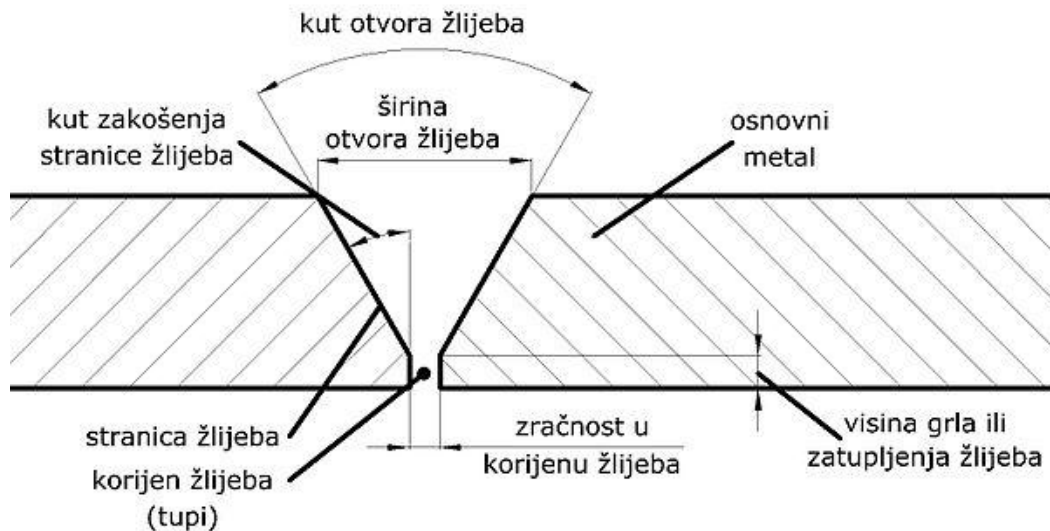


*Slika 3.1. Križni, kutni rubni i prirubni spoj*

### **3.3. Odabir i priprema žlijeba**

Dok određujemo zavareni spoj moramo definirati element žlijeba i zavarenog spoja. Žlijeb predstavlja obrađeni ili neobrađeni rubni dio osnovnog metala na kojemu će se spajati metal tj. izvoditi zavarivanje. Oblik i dimenzije žlijeba mogu biti različiti, a odabir oblika uglavnom ovisi o debljini elemenata koji se trebaju zavariti, te namjeni spoja. Generalno, vrijedi pravilo da dimenzije žlijeba trebaju omogućiti minimalan otvor (zbog što manjih troškova dodatnog materijala a da postižu kvalitetan zavareni spoj). Naslagivanje zvara u žlijeb definirano je u planu polaganja zvara. Prije samog polaganja zvara, površina žlijeba se obrađuje mehanički i toplinski, te detaljno čisti od nečistoća (greške rezanja ili prljavštine i oksidi) koje mogu ugroziti kvalitetu zvara. Detaljniji prikaz dijelova žlijeba nalazi se u slici 3.2.

## DIJELOVI "V" ŽLIJEBA



Slika 3.2. Detaljni prikaz dijeova žlijeba

### 3.4. Definiranje redoslijeda zavaravanja

Redoslijed i smjer polaganja zavaravanja definiran je u planu zavaravanja. Dok se zavaruje u metalu dolazi do poprečnog i uzdužnog srezanja, zato pri formiranju plana zavaravanja moramo uzeti u obzir određena pravila: [5]

1. Pri zavarivanju šavova različitih debljina, prvo se zavaruju deblji šavovi koji imaju veće ukupno stezanje, a onda kraći šavovi
2. Kod zavarivanja cijevi većih promjera, zavar se polaže dijametralno nasuprotno
3. Kad zavarujemo više limova, najprije se zavaruju poprečni pa onda uzdužni spojevi
4. Pri zavarivanju dužih konstrukcijskih elemenata, zavarivanje započinjemo na sredini pa ga izvodimo prema krajevima postavljenih elemenata



## **4. NAJRAŠIRENIJI POSTUPCI ZAVARIVANJA**

Postoji jako puno različitih postupaka zavarivanja i načina njihovih podjela. Prema Međunarodnom institutu za zavarivanje (IIS/IIW) osnovna klasifikacija načina zavarivanja vrši se prema načinu prijenosa energije, stoga imamo podjelu postupaka zavarivanja:

1. električnim lukom
2. energetske tokom velike gustoće
3. mehaničkim djelovanjem
4. prolaskom električne sturke
5. “ostalim” načinima npr. postupcima difuzijskog spjanja, lemljenja, itd.

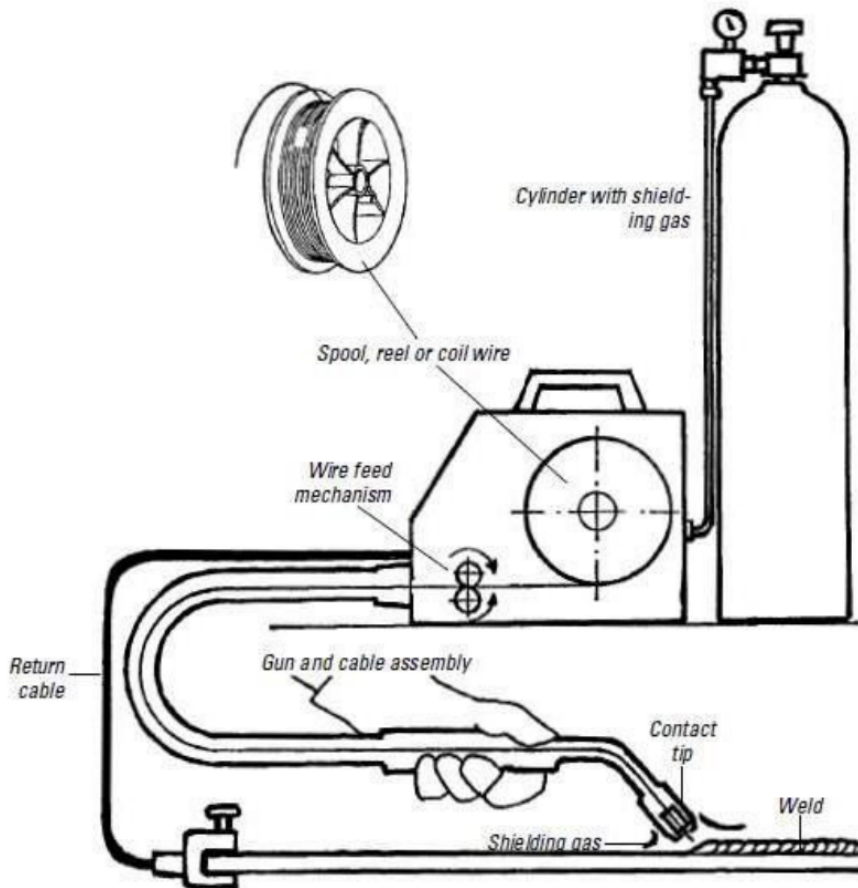
U nastavku ovog poglavlja iznjeti ću kratak, ali opisni pregled, kao i prednosti i nedostatke glavnih i najčešće korištenih načina zavarivanja. Pod te postupke (uglavnom) spadaju elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG), elektrolučno zavarivanje pod zaštitom aktivnog i inertnog plina (MIG/MAG), te ručno zavarivanje obloženim elektrodama (REL). Navedeni postupci koriste taljenje na mjestu spajanja kako bi ostvarili zavareni spoj, sa ili bez dodatnog materijala i bez djelovanja pritiska na spoj [7].

### **4.1. Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog ili aktivnog plina (MIG/MAG)**

#### **4.1.1. Opis načina rada**

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (pod zaštitom inertnog ili aktivnog plina) je automatski ili poluautomatski način zavarivanja. Sastoji se od mehanizma za stalno dovodenje gole žice kao elektrode za zavarivanje koja je zaštićena inertnim ili poluinertnim mješavinama zaštitnih plinava. Elektroda je i dodatni materijal koji se mješa sa osnovnim materijalom koji se zavaruje. Samo zavarivanje se odrađuje ručnim ili mehaniziranim vođenjem plamenika (stoga može biti automatsko ili poluautomatsko).

Električni luk uspostavljamo kresanjem (izazivanjem kratkog spoja) žice za zavarivanje i radnog komada koji varimo (a spojen je na polove električne struje). Ravnomjerno dodajemo žicu za zavarivanje u električni luk, te ju talimo za stvaranje električnog spoja. Potrebnu opremu za provođenje MIG/MAG zavarivanja vidimo na slici 4.1.



*Slika 4.1. Potrebna oprema za provođenje MIG-MAG zavarivanja*

#### 4.1.2. Prednosti i nedostaci

Glavne prednosti ovog načina zavarivanja su manja cijena opreme za zavarivanje (u odnosu na TIG postupak), jednostavna prilagodljivost za masovnu i serijsku proizvodnju, te širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje, mogućnost zavarivanja u svim položajima, te velika mogućnost automatizacije i robotizacije (u odnosu na TIG postupak).

Najveći nedostaci ovog načina zavarivanja uglavnom se odnose na zavarivača - potrebno je puno vremena i edukacije, jamac kvalitete zavara je vještina zavarivača. Slabija kvaliteta zavarenog spoja u odnosu na TIG postupak, potrebna dobra ventilacija prostora radi oslobođenih plinova za vrijeme zavarivanja.

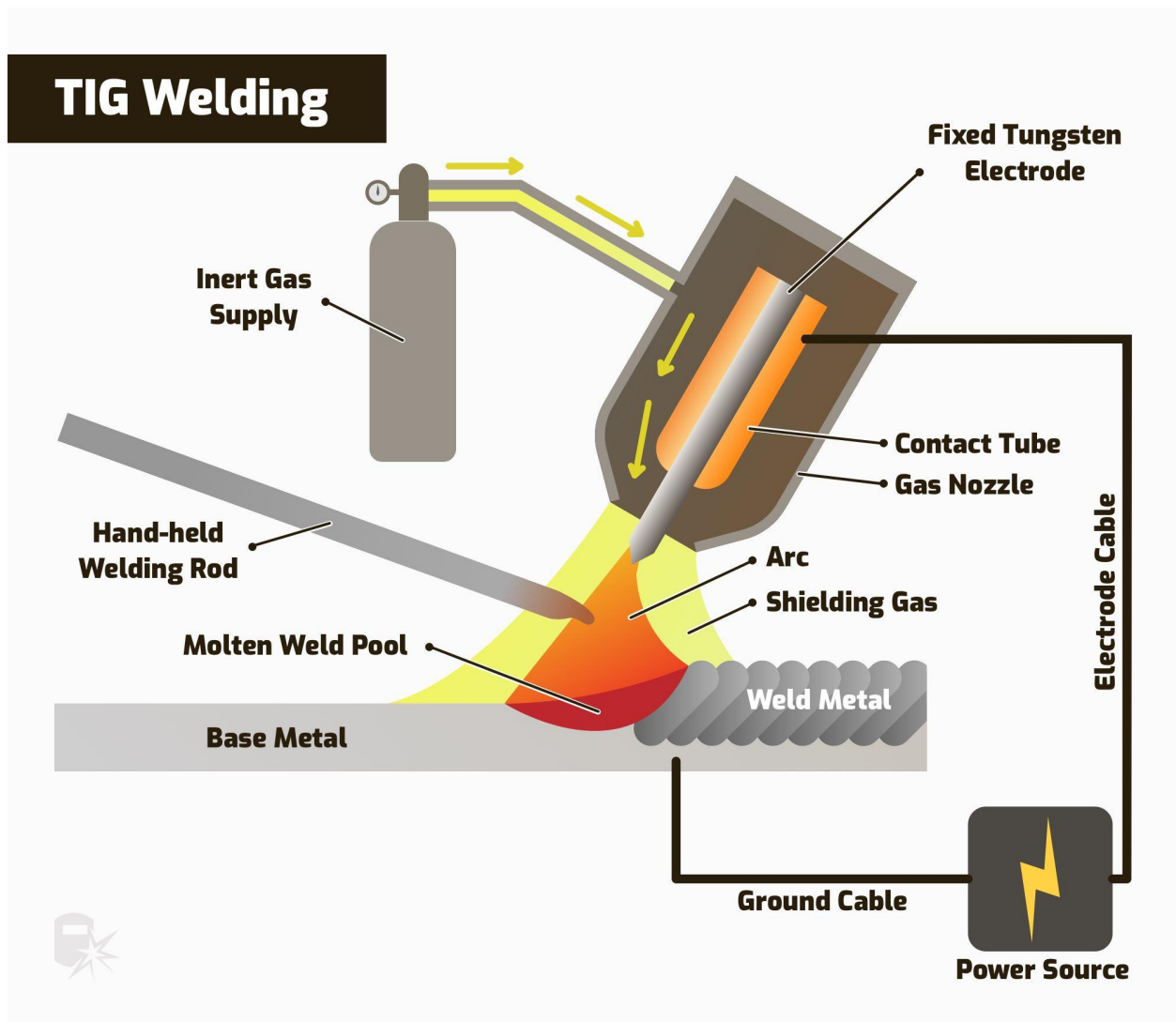
#### 4.1.3. Primjena

MIG i MAG postupci imaju široke spekre primjena - zbog visoke mogućnosti automatizacije uglavnom se koriste kod proizvodnog zavarivanja velikog broja komada i serija. Puno su ekonomičniji u odnosu na REL postupak zavarivanja (mogu položiti više kilograma materijala u istoj količini vremena, kraći su zastoji jer nije potrebno zamjeniti elektrode, te daju čišće zavare). Uglavnom se koriste za cijevi i limove debljina od 1 do 20 mm (a nekad i deblje).

## **4.2. Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG)**

### 4.2.1. Opis načina rada

TIG postupak zavarivanja je ručni postupak zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu (ili smjesi plinova) koji koristi netaljivu volframovu elektrodu i dodatni materijal. Uspostavljeni električni luk je izrazito stabilan koji omogućuje zavare visoke kvalitete. Električni luk uspostavljamo koristeći visokofrekventne generatore koji se uključuju na jako kratko (na dio sekunde taman prije zavarivanja). Nakon što uspostavimo električni luk, generator se gasi, a postupak se nastavlja sa ili bez dodavanjem dodatnog materijala (u obliku žice) u električni luk u zoni zaštitnog plina (argon i helij). [9]. Vizualni prikaz TIG zavarivanja opisan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Potrebna oprema za provođenje TIG zavarivanja

#### 4.2.2. Prednosti i nedostaci

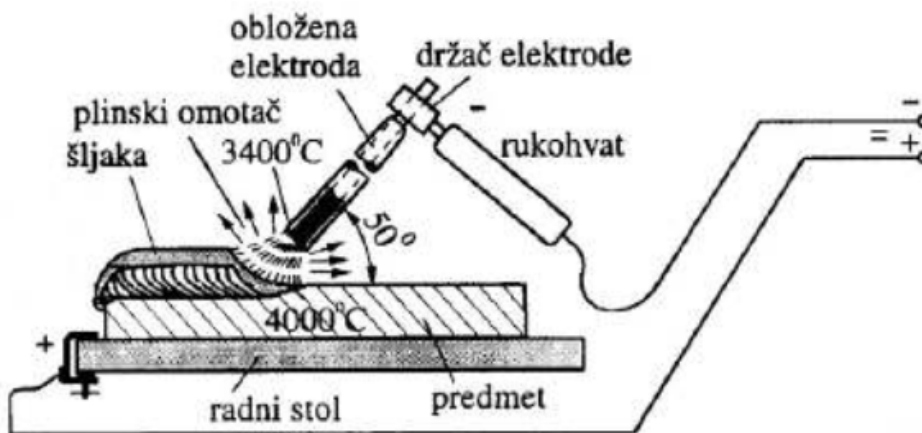
Najveće prednosti ovog postupka zavarivanja su njegova preciznost i kvaliteta položenog zavara, te mogućnost primjene na izrazito širok raspon metala. Ova metoda koristi izmjeničnu struju, te se uglavnom primjenjuje na zavarivanju magnezija, aluminijskih i njihovih legura. Kako bi zavarivali metale kao što su titan, nehrđajuće čelike, bakar, čelični limovi trebamo koristiti istosmjernu struju sa negativnim (minus) polom na elektrodi.

Najveći nedostatak ovog načina zavarivanja su njegova ograničenost na tanke materijale, relativno spora brzina polaganja zavara, visoka cijena (skupa oprema, zaštitni plin, volfram), te nemogućnost automatizacije (uz veliko vrijeme izobrazbe zavarioca).

### 4.3. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL)

#### 4.3.1. Opis načina rada

Zavarivanje obloženom elektrodom se temelji na korištenju struje za pokretanje električnog luka (uspostavlja se kratkim spojem kresanjem elektroda) između osnovnog metala i potrošnih elektroda. Njihova obloga stvara zaštitnu zonu od oksidacije i zagađivanja nusproduktima zavarivanja kao što je ispuštanje ugljikovog dioksida CO<sub>2</sub>. Spomenuta je elektroda ujedno i dodatni materijal koji stvara zavar. Ovaj je način zavarivanja detaljnije prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3. Potrebna oprema za provođenje REL zavarivanja [11]

#### 4.3.2. Prednosti i nedostaci

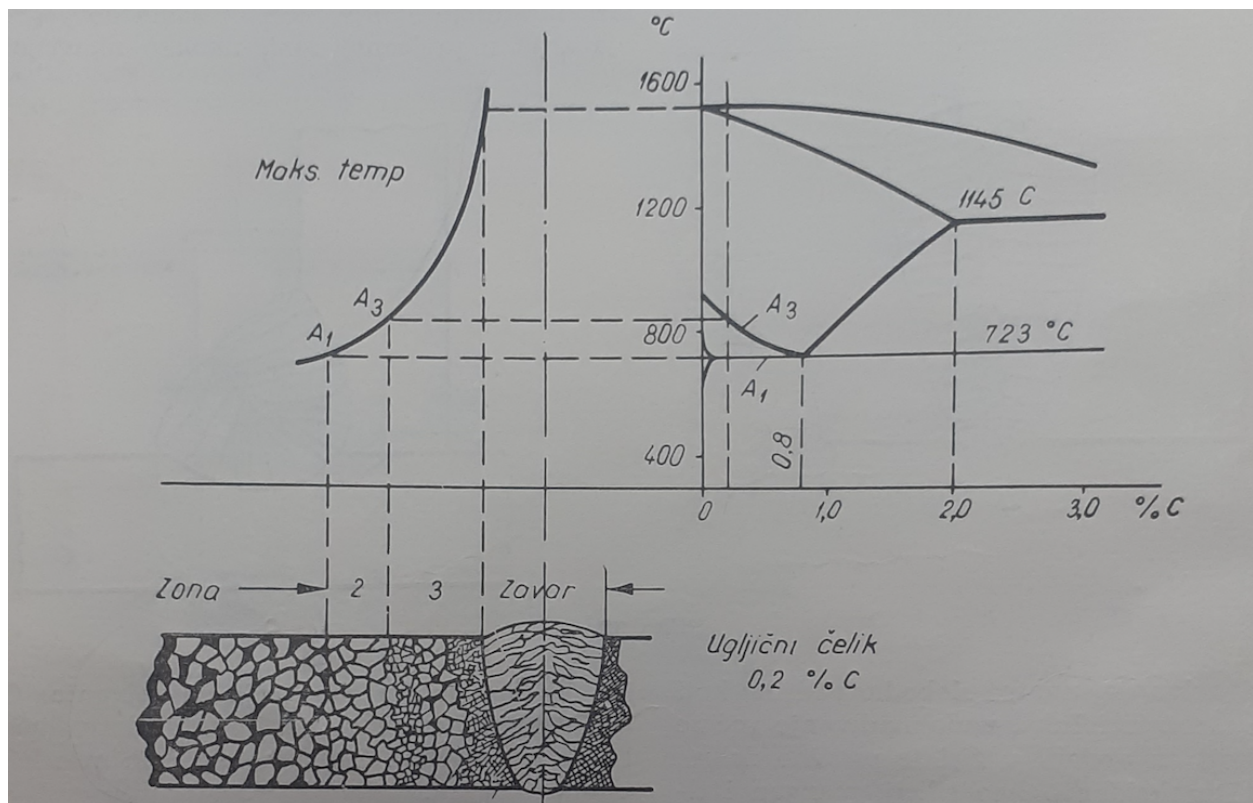
Najveće prednosti ovog načina zavarivanja su upravo njegova jednostavnost, raznovrsnost, te niski troškovi opreme. Najveći nedostaci ovog načina zavarivanja su njegova ograničenja (primjenjuje se uglavnom na čelike), te relativno sporo vrijeme zavarivanja (zbog česte promjene elektroda). Osim stvaranja zaštitne zone, obloga i stabilizira električni lut, te doprinosi postizanju rafinacije (pročišćavanja taline smanjivanjem količina fosfora i sumpora u njoj), dezoksidacije i legiranja.

#### 4.3.3. Primjena

Ovaj se način zavarivanja najčešće koristi u proizvodnji i popravku, te kod navarivanja. Zbog sporog vremena zavarivanja REL zavarivanje se obično primjenjuje na kratkim zavarima (debljine manje od 20 mm sučeonih zavarenih spojeva).

## 5. POGREŠKE PRI ZAVARIVANJU

Visoke temperature zagrijavanja metala uzrokuju promjene u njegovoj mikrostrukturi, te se promjene odnose ne samo na mehanička, već i kemijska svojstva osnovnog metala. Većina načina zavarivanja uzrokuje lokalno zagrijavanje i taljenje, sa temperaturama do temperatura tališta. Kako bi zavarivanje bilo što ekonomičnije, zagrijavanje se provodi lokalno. Kad zavarujemo, u kratko vrijeme dovedemo veliku količinu topline, po prestanku zavarivanja zavar se naglo hladi. U narednim ću poglavljima opisati samu strukturu zavarenog spoja, kao i opisati najčešće greške do kojih dolazi [4].



Slika 5.1. Promjena sturkture zavora porastom temperature [12]

## 5.1. Najčešće greške na zavarenom spoju

Prema međunarodnom institutu za zavarivanje, sukladno normi EN 26520:1992 [13] pogreške u zavarenim spojevima klasificirane su u šest osnovnih grupa:

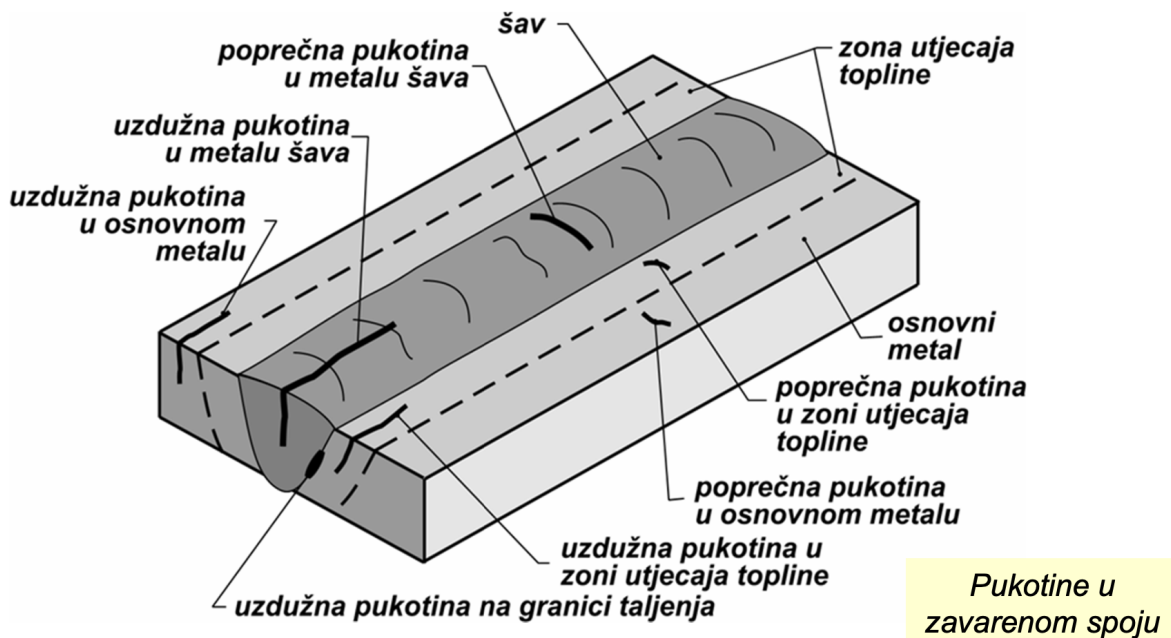
### 5.1.1. Pukotine

Jedna od najnepoželjnijih vrsti greška, izrazitno su opasne i ugrožavaju integritet zavarenog spoja. Nastaju kao posljedica prekida kontinuiteta metala a do njih dolazi zbog skupljanja naprezanja (povišena unutarnja naprezanja), postojanja upetosti zavarenih dijelova, stezanja metala zavara, nepoželjnih metalurških promjena u zoni utjecaja topline. Dijelimo ih na tople (nastaju za vrijeme prijelaza iz tekućeg u kruto stanje pri visokim temperaturama) i hladne pukotine (javljaju se nakon što se zavareni spoj ohladi).

Najčešći uzroci toplih pukotina su nečistoće osnovnog i dodatnog materijala, kao i nepravilno odvođenje topline (središnji dio zavara se hladi sporije pa se metal počinje stezati što uzrokuje unutarnja naprezanja). Porastom udjela prljavština kao što su sumpor, fosfor i ugljik smanjuju otpornost pojavljivanja toplih pukotina.

Glavni uzrok hladnih pukotina je otežano stezanje metala šava uz porast unutarnjih naprezanja zbog promjena okolne temperature. Prikaz pukotina na šavu dat je u slici 5.2.





Slika 5.2. Prikaz zone utjecaja topline

### 5.1.2. Poroznosti

Poroznost ili pojava napuklina plinskih pora nastaje zbog zarobljenog plina za vrijeme skrućivanja u metalu. Plinovi kao što je ugljični monoksid nastaju za vrijeme skrućivanja (prisutan kisik reagira sa ugljikom za vrijeme skrućivanja). Urozci poroznosti mogu biti i nečistoća na površinama zavarivanog spojav, vlažnost, loše izvođenje zavarivanja. Rendgenski prikaz poroznosti dat je na slici 5.3. Ova se greška označava s 201, ovisno o rasporedu i položaju ta se oznaka nadopunjuje sa brojevima 1, 2, 3 i 4:

1. 2011 za lokalnu plinsku poru
2. 2012 za jednoliko raspoređenu plinsku poru
3. 2013 za skupinu plinskih pora
4. 2014 za linijski niz pora



*Slika 5.3. Rendgenska snimka poroznosti*

### 5.1.3. Uključine

Uključine su posljedica zaostajanja nečistoća i drugih čestica koje se nakupe u metalu (na šavu), dijelimo ih na:

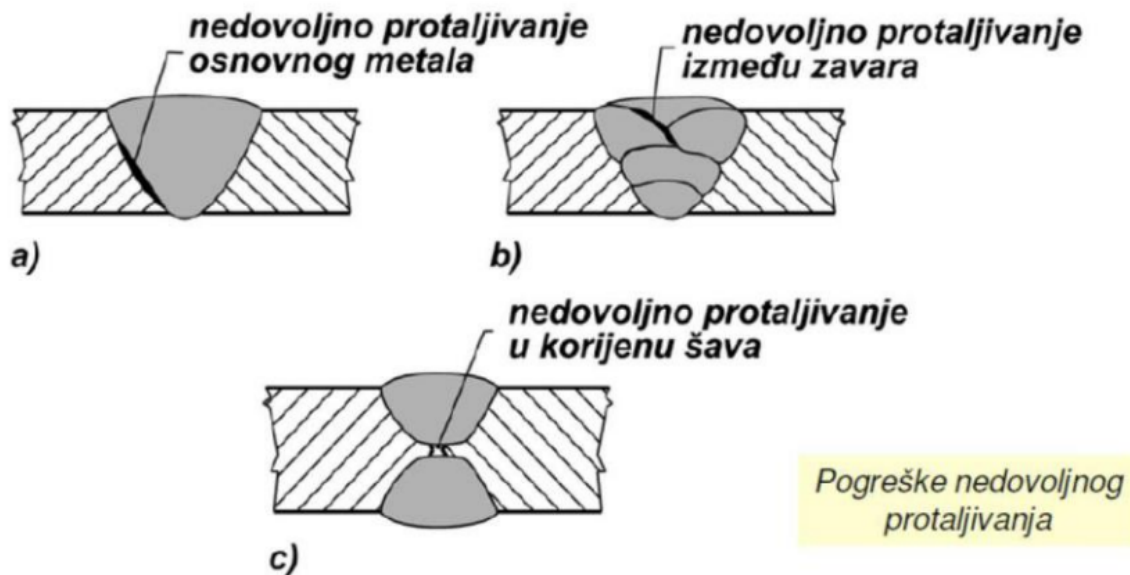
1. Uključine troske
2. Uključine praška
3. Uključine oksida

#### 5.1.4. Nedovoljno protaljivanje

Ova se greška javlja između metala zavara i osnovnog metala ili pojedinih zavara u šavu, a prvotno nastaju zbog loše tehnike rada zavarivača, nedovoljne jakosti struje zavarivanja ili nečistoća koje su se nakupile na mjestu spajanja.

Ove greške kategoriziramo na:

1. Nedovoljno protaljivanje bočnih podloga zavara, te nedovoljno uvarivanje pojedinih zavara u šavu
2. Pogreške nedovoljnog protaljivanja u samom korijenu šava

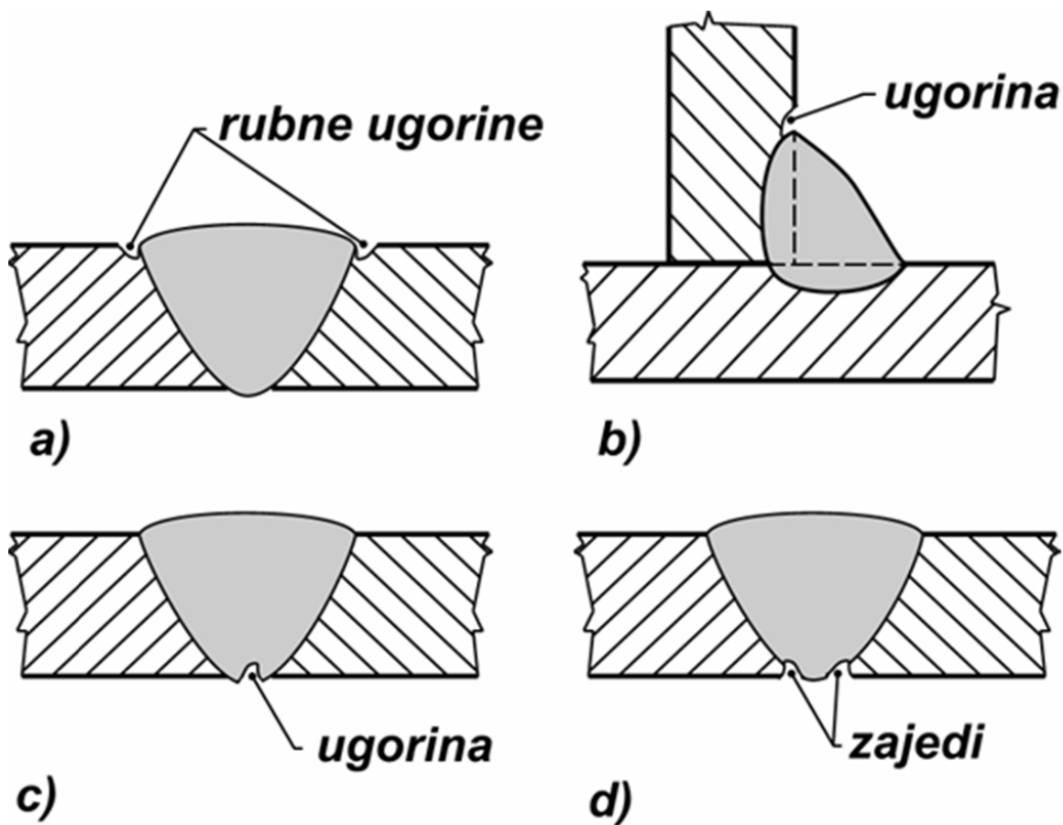


Slika 5.5. Prikaz nedovoljnog protaljivanja

### 5.1.5. Nepravilnost oblika

Ova grupa kategorizira različite nepravilnosti oblika i naličja šava koje mogu uzrokovati svakakve naknadne probleme. Najčešće pogreške u vidu nepravilnosti oblika su:

1. Nepravilni kutovi prijelaza površine šava na osnovni metal
2. Loše izvedeni nastavci zavara
3. Nepravilnosti površina šava
4. Prevelika nadvišenja lica šava
5. Ugorine
6. Nedovoljno ispunjenje žlijeba
7. Udubljenja korjenih strana šava



Slika 5.6. Prikaz nepravilnosti oblika - ugorina i zajedi

## **6. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA**

### **6.1. Kvaliteta zavarenog spoja**

Svaki proizvod mora zadovoljiti standarde koji garantiraju kvalitetu njegove proizvodnje. Ovakva su standardizirana ispitivanja od posebne važnosti kod zavarenih spojeva o kojima ovisi sama stabilnost konstrukcije. Spomenuti su standardi kvalitete i načini njihovih ispitivanja određeni ISO i EN normama. Kvaliteta zavarenog spoja se obično utvrđuje ispitivanjima navedenim HRN EN ISO 15614 i HRN EN ISO 9806 normama [11] .

Kako bi ostvarili zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja, moramo napraviti određenu pripremu i realizaciju u vidu:

1. Adekvatne pripreme za izvođenje radova
2. Korištenja odgovarajućih osnovnih i dodatnih metala
3. Zavarivanja pri odgovarajućim temperaturama za te metale koristeći prigodan izvor stuje za zavarivanje
4. Pridžavanja propisanog plana i redoslijeda zavarivanja
5. Kontinuiranim nadziranjem izvođenja radova - prije, za vrijeme i nakon zavarivanja

Načine ispitivanja kvalitete zavarenog spoja možemo podijeliti u dvije osnovne skupine - ispitivanje bez i sa razaranjem zavarenog spoja.

## 6.2. Ispitivanje bez razaranja

Ispitivanje bez razaranja provodi se po cijeloj dužini zavara, stoga prvo njih provodimo. Najčešće metode ispitivanja zavarenih spojeva bez razaranja su:

### 6.2.1. Vizualna inspekcija

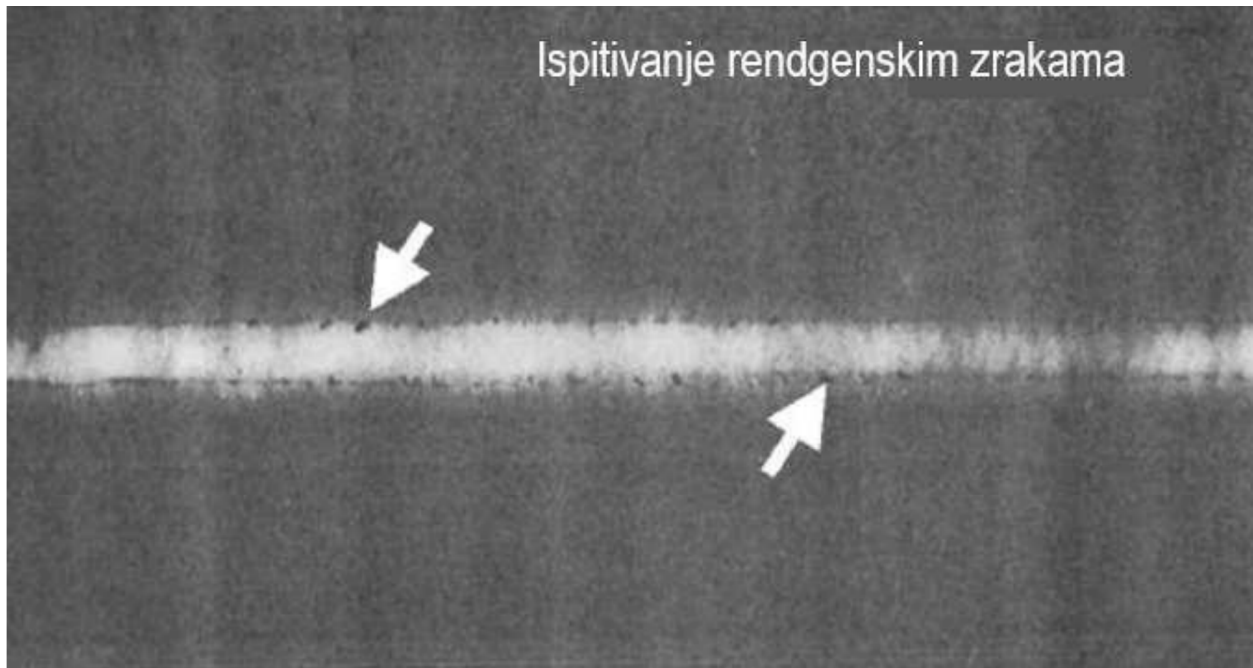
Ova se provjera provodi i prije, za vrijeme, te nakon provođenja zavarivanja. Cilj je okom (uz pomoć instrumenata i pribora za mjerenje) provjeriti pridržavanje propisane prakse zavarivanja i kvalitetu rada. Tako se provjeravaju pripreme spojeva, žlijebova, oblici i dimenzija šavova, kao i izgleda površina spojeva [1].

### 6.2.2. Provjera nepropusnosti

Ova se provjera najčešće se provodi tlačnim zrakom ili vodom, vakuumskim ispitivanjem pojedinih spojeva, premazivanjem petrolejem. Kada spoj nije nepropusan tragovi vode (ili petroleja) izbijaju na drugoj strani[1].

### 6.2.3. Provjera radiografskim ili rendgenskim snimanjem

Rengenske zrake prolaze kroz spoj i uzrokuju zatmnjenja na filmu koji je sa druge strane; na mjestima na kojima se nalaze pukotine film će biti izrazitije zatamnjen. U ovaj tip ispitivanja spada i provjera ultrazvukom pri kojoj mjerimo odjek za vrijeme prolaska ultrazvučnih valova kroz osnovni metal.[1]



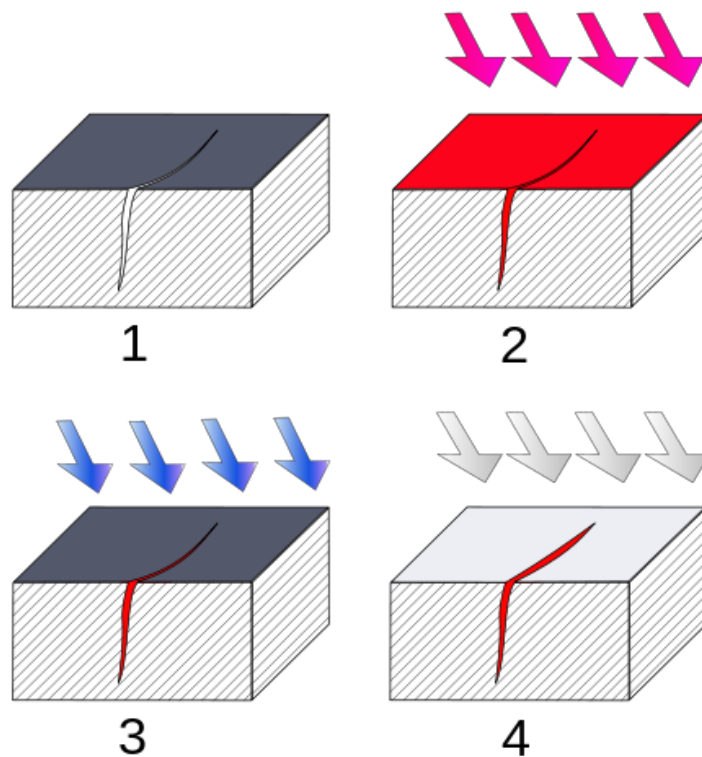
*Slika 6.1. Inspekcija zavara rendgenskim zrakama[16]*

#### 6.2.4. Provjera magnetskim metodama

Uz pomoć magnetskog polja nalazimo mjesta pogreške. Ove se metode koriste za otkrivanje nepravilnosti na samoj površini zavara ili do 1-2 milimetra njene dubine[1].

#### 6.2.5. Provjera penetrantskim tekućinama

Preljevanjem posebnih fluorescentnih penetrantskih tekućina po površini metala ona se krene zavlačiti u pukotine. Nakon što se komad koji se ispituje pusti da odleži (kako bi se penetrant do kraja ulio u pukotine), sa njega se odstrani penetrantska tekućina i naknadno nanese razvijajući (tekućina koja ima svojstvo da na površinu izvuče penetrant iz šupljina. Na mjestima na kojima su šupljine jasno se vide tragovi (boja penetranta - obično crvena). Način provođenja ovog tipa ispitivanja opisan je u slici 6.2. [1]



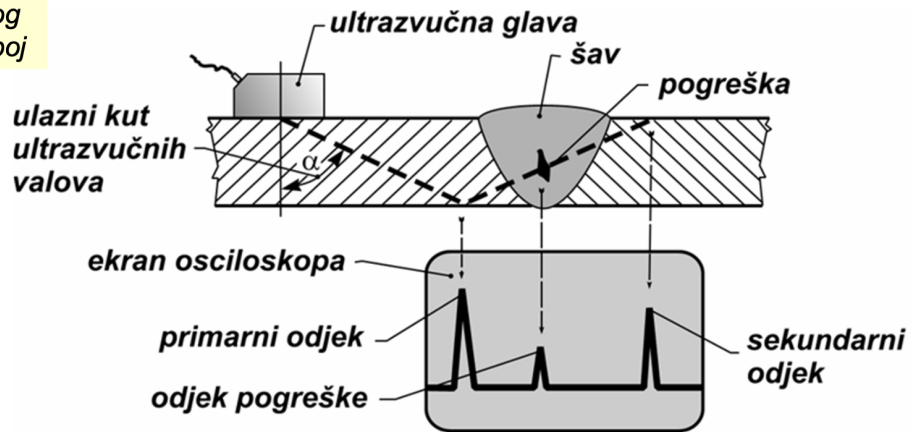
*Slika 6.2. Inspekcija zavora rendgenskim zrakama*

#### 6.2.6. Provjera ultrazvučnom metodom

Ova se metoda temelji na prolasku ultrazvučnih valova kroz zavar. Ultrazvučni se valovi prolaženjem kroz osnovni metal dobijaju od prepreka (pogreški) i vraćaju nazad i tvore odjeke. Odašiljač je smješten u ultrazvulnoj glavi. Ova nam metoda otkriva pogreške u samom spoju bez obzira na debljinu dijelova, a opisuje ju iduća slika 6.3.



Shematski prikaz  
prolaska ultrazvučnog  
vala kroz zavareni spoj



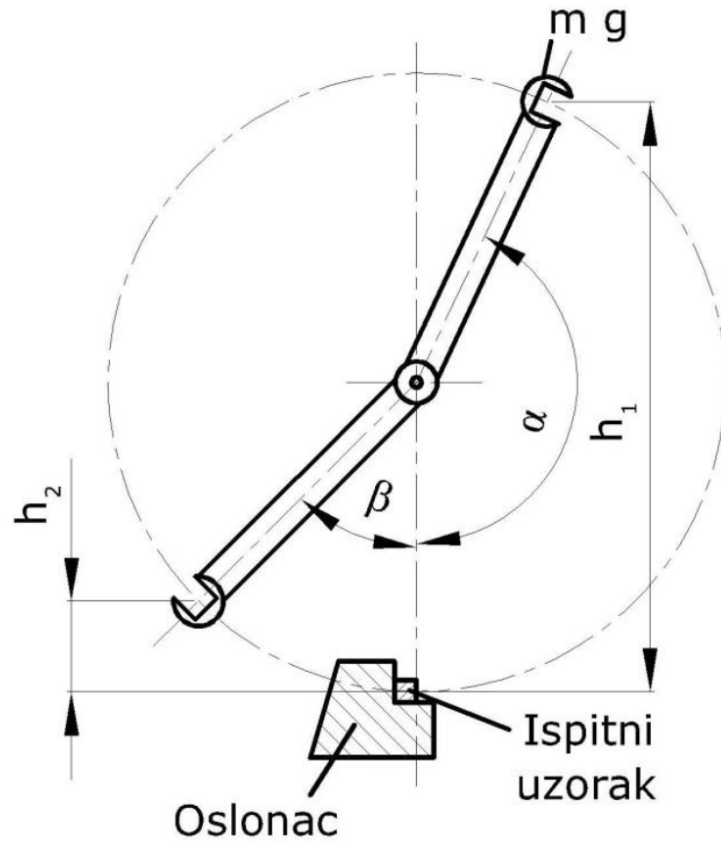
Slika 6.3. Inspekcija zavara rendgenskim zrakama

### 6.3. Ispitivanje sa razaranjem

Osim testa savijanja i vlačnog testa koje ću na primjeru svog završnog rada detaljno objasniti u narednom poglavlju, najčešće metode ispitivanja zavarenog spoja sa razaranjem su navedene u idućim potpoglavljima.

#### 6.3.1. Ispitivanje udarnog loma

Ovom metodom ispitujemo otpornost na dinamička naprežanja (potrebni rad koji moramo izvršiti da bi slomili uzorak). Točnije, određuje se mjera žilavosti metala - udarni rad loma (J). Ispitivanje se provodi sa dva uzorka koji imaju zareze u oblicima slova "V" i "U". Posebno obrađeni uzorci (za ovaj tip ispitivanja) stavljaju se na oslonac gdje ih udara Charpyjev bat. Rad loma računamo oduzimanjem proizvedenog i neutrošenog rada. Isti se udarni lom može ispitati i Vickensovom metodom [17]



Slika 6.4. Chapyjev Bat [17]

### 6.3.2. Ispitivanje tvrdoće

Metodama ispitivanja tvrdoće cilj je odrediti odnos između sile koja utiskuje i same površine otiska, te izmjeriti sam utisak. Unaprijed definiran utiskivač (veličinom i oblikom) utiskuje se pod kutom od 90 stupnjeva u pripremljen uzorak definiranom silom. Tvrdoća se određuje mjerenjem dubine i dimenzija utiska, kao i specifičan otpor prodiranju testnog utiskivača. Utiskivači se obično rade od dijamanta, oblika četverostrane piramide. Ovom metodom ispitivanja potrebno je izmjeriti ne samo tvrdoću zavara, već i zone utjecaja topline, te osnovnog zavara. Broj setova mjerenja ovisi i o debljini metala koju ispitujemo [1].

### 6.3.3. Makroskopsko ispitivanje

Prilikom ovog ispitivanja pripremljenu površinu uzorka umačemo u kiselinu, te pratimo razlike u materijalu promjenom boja površine zbog nagrivanja. Nakupine nečistoća ostavljaju mrlje određenih boja.

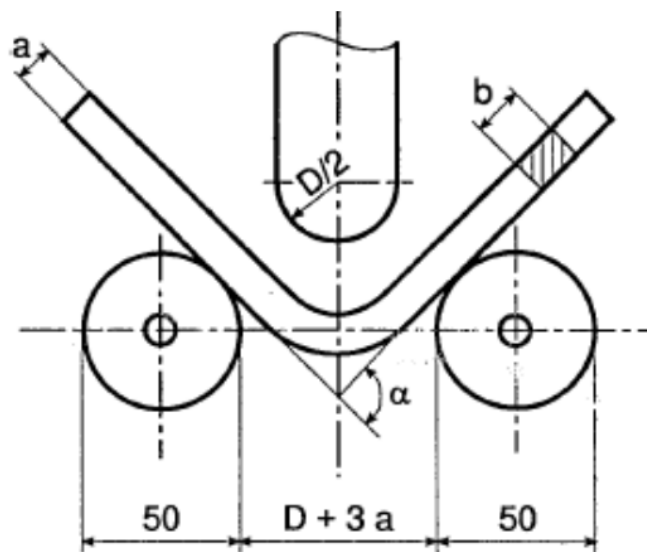
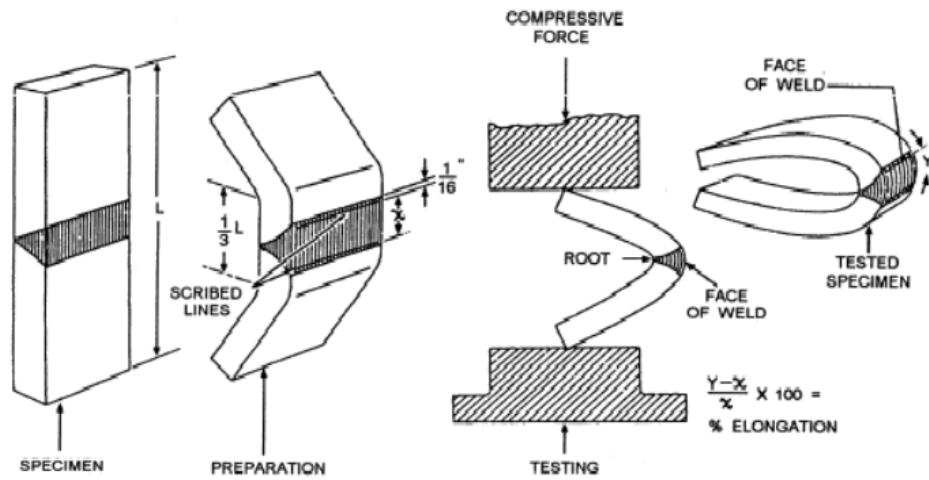
### 6.3.4. Mikroskopsko ispitivanje

Metalografskim ispitivanjem mikrostrukture zavara omogućuje nam da utvrdimo nepravilnosti na mikrorazini. Nakon što je promatrani zavar ispoliran i nabrušen premazuje se kiselinom koja ga nagrize sa ciljem razvijanja strukture kristalnih zrna. Posljedično, nagrivanje granica legiranog i metalnog uzorka formira jasno prepoznatljive granice između pojedinih zrna druge boje. Na spomenutim se granicama vide nečistoće kao deblji ili tanji izdvojeni slojevi. Nagrivanje nam može otkriti ostale čimbenike za ocjenu kvalitete zavarenog spoja kao što su greške u zavaru, oblik zrna, broj slojeva itd.

Pripremljeni se uzorak naknadno fotografira se pod elektronskim mikroskopom, te se softverski određuje tvrdoća uzorka usporedbom strukture zrna.

### 6.3.5. Test savijanja

Test savijanja (eng. Transverse side bend test) koristimo za otkrivanje i analizu modula elastičnosti pri savijanju. Ovaj je test definiran normom EN 910 [12]. Pokazuje nam deformacije i naprezanja savijanja uzorka koji trebamo ispitati. Ovaj se test vrlo jednostavno provodi - nakon savijanja uzorka na samom zavaru tražimo pukotine, ako su one manje od 3 mm zavar je zadovoljavajuće kvalitete. Prikaz testa dan je na slici 6.5. Ovaj ću test detaljnije opisati u idućem poglavlju.



Slika 6.5. Izvedbe testa savijanja

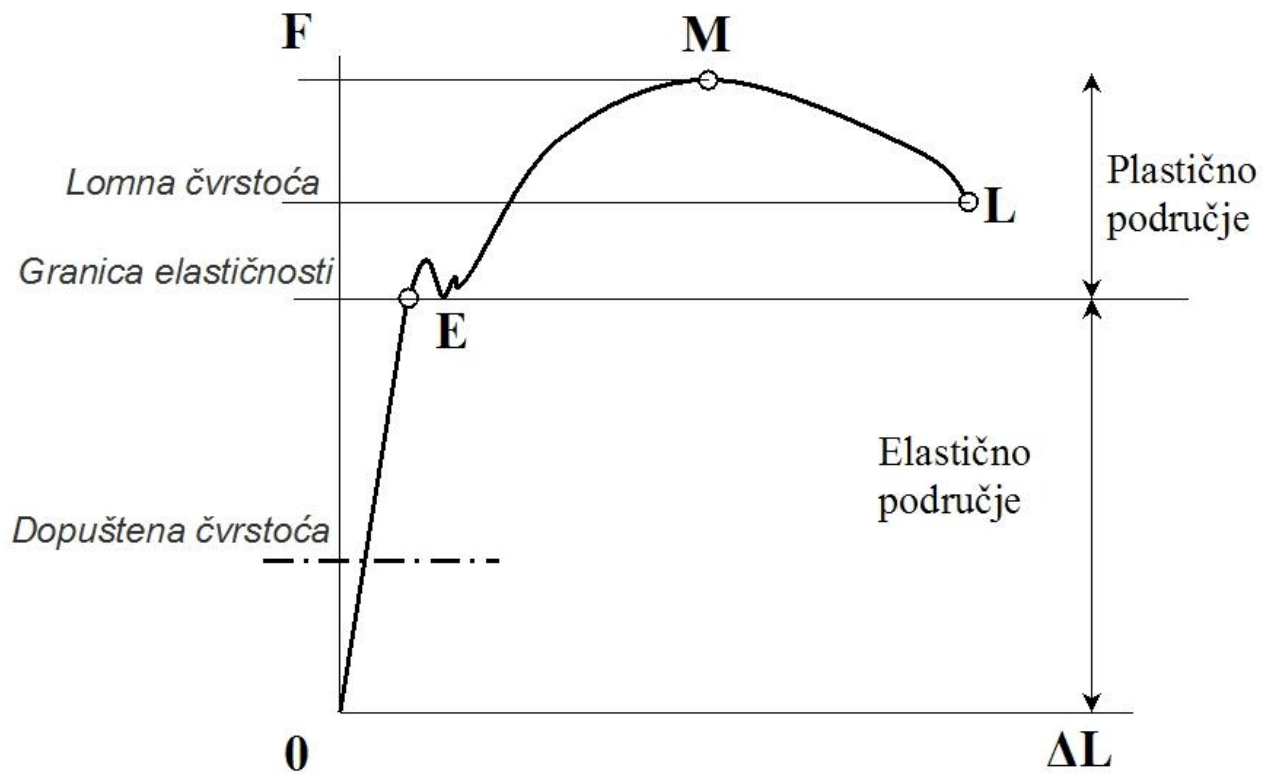
### 6.3.6. Test vlačne čvrstoće

Ovaj se test provodi na kidalici, sa ciljem analiziranja vlačne čvrstoće uzorka, te njegove deformabilnosti. Epruvetu kružnog presijeka stavimo u kidalicu i opterećujemo dok ne ustupi granica loma, ako je lom nastao na samom zavaru on nije zadovoljavajuće kvalitete, dok ako do loma dođe na rubovima epruvete on je zadovoljavajuć. Ovaj je test detaljnije opisan u idućem poglavlju, a prikazuje ga slika 6.6.



Slika 6.6. Vlačni test

Prije nastupanja loma epruveta prolazi određene točke koje Hookov dijagram (odnos naprezanja i izduženja) definira kao granicu proporcionalnosti, granicu elastičnosti, granicu tečenja, granicu vlačne čvrstoće i granicu loma [23]. Dijagram proporcionalnosti naprezanja (Hookov dijagram) kao i prijezne zone prikazani su na slici 6.7.

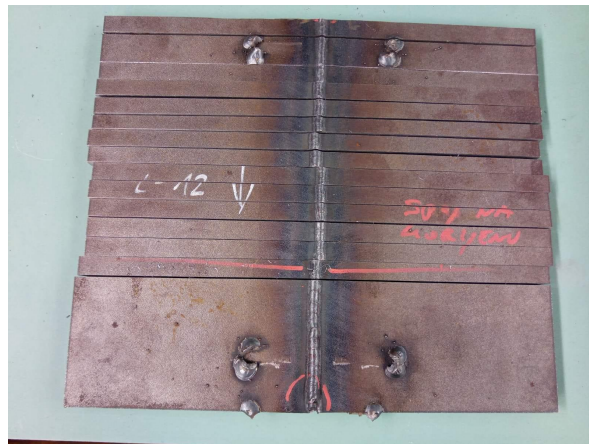


Slika 6.7. Hookeov dijagram

## 7. ISPITIVANJA STROJNOG DIJELA MJ.20-SI.71

### 7.1. Opis predmeta ispitivanja - strojnog dijela MJ.20-SI.71

Strojni dio MJ.20-SI.71 je sučeoni zavar ploče. Za potrebe svakog testa izradila su se po 2 uzorka. Fotografija pripreme uzoraka je priložena na slikama 7.1 i 7.2.



*Slika 7.1. Primarna priprema zavora za test*



*Slika 7.2. Narezani uzorci*

## 7.2. Test savijanja

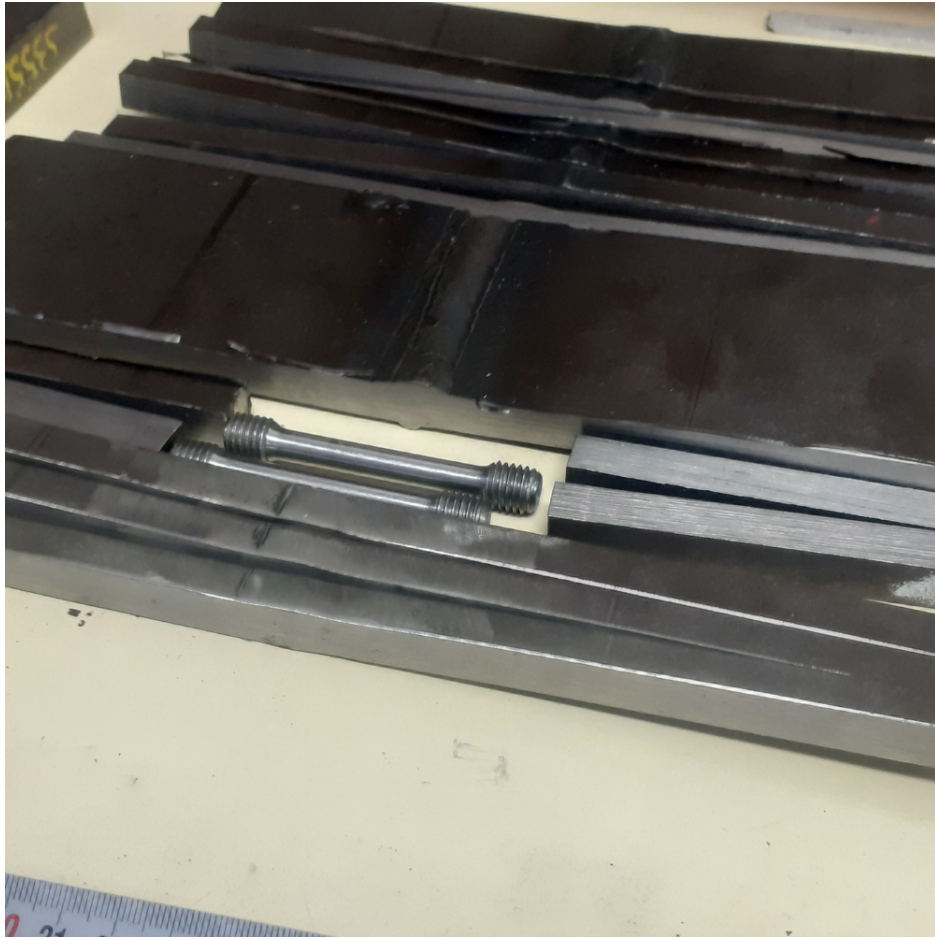
Cilj testa savijanja (eng. Transverse side bend test) je analiza modula elastičnosti pri savijanju, te deformacije i naprezanja savijanja uzorka na čija svojstva ispitujemo. Test se izvodi po normi ISO 15614-1 [26]. Ovaj je test vrlo jednostavan za provesti u smislu pripreme uzorka i samog ispitivanja. Za vrijeme ovog ispitivanja istovremeno nastupaju vlačno i tlačno naprezanje.

### 7.2.1. Priprema uzorka za savijanje i test

Debljina testnog uzorka mora biti jednaka debljini osnovnog materijala, ako je ona veća od 30 mm onda ju je potrebno dodatno obraditi na debljinu do 10 mm. Širina testnog uzorka je približna njegovoj debljini (presijek uzorka je kvadrat), dok njegova duljina treba odgovarati dimenzijama stroja na kojem provodimo testiranje. Kad je spreman, ispitni se uzorak postavi na oslonce (2 paralelna valjka), dok treći vrši pritisak na uzorak i time ga savija. Za vrijeme savijanja na uzorku nesmiju nastati pukotine veće od 3 mm.

Drugi način provođenja ovog testa je pomoću valjaka. Ovaj se alternativni pristup uglavnom koristi za savijanje legura aluminija ili ostali spojeva u kojem jedan od zavarenih metala ima nižu granicu razvlačenja. Jedan se kraj uzorka stisne u škripu ispitnog uređaja dok veliki i mali valjak (koji su u paralelnom položaju) savijaju ispitni uzorak na način da manji valjak savija uzorak oko velikog. Pripremljeni uzorci za testiranje prikazani su na slici 7.3.





*Slika 7.3. Pripremljeni uzorci spremni za test*

#### 7.2.2. Rezultati testiranja strojnog dijela MJ.20-SI.71

Pripremljeni uzorci bili su podvrgnuti Transverse side bend testu na fakultetskoj kidalici. Razmak između vijaka iznosio je oko 85-95 mm, promjer valjka koji je pritiskao bio je 30 mm. Uzorci su se prvo savili na kut približan  $120^\circ$  nakon čega smo ih nastavili tlačno opterećivati. Samo provođenje testa zabilježeno je u narednim fotografijama (slike 7.4., 7.5., 7.6., 7.7.) koje sam uslikao dok smo provodili test u laboratoriju fakulteta na Zavodu za materijale.



*Slika 7.4. Početak testa savijanja*



*Slika 7.5. Savijanje uzorka 1*



*Slika 7.6. Savijanje uzorka 2*



*Slika 7.7. Savijeni uzorci su nemaju većih pukotina u usporedbi sa napuknutim primjerom uzorka sa drugog zavara*

### 7.3. Test vlačne čvrstoće

Provedba ovog testa vrši se na kidalici, te nam otkriva mehaničku otpornost i deformabilnost uzorka. Uzorak koji trebamo testirati prvo je potrebno storjno obraditi u epruvetu. Nakon obrade i poliranja uzorak (epruvetu) postavimo u kidalicu, nekad je i porebno zavidati njegove krajeve (epruveta ima navojna hvatišta koja se zavidaju u čeljusti kidalice). Same karakteristike oblika i dimenzija epruvete opisuje standard DIN 50125.

#### 7.3.1. Provedba testa vlačne čvrstoće

Dok provodimo test linearno povećavamo silu opterećenja sve do loma epruvete. Kako je deformacija epruvete ne prati linearno povećanje naprezanja nastupa izduženje i lom epruvete. Cilj testa je utvrditi mjesto pojavljivanja loma - ako se lom pojavi bliže krajevima epruvete, a ne na mjestu zavaravara se smatra dostatne kvalitete. Slika 7.9. opisuje kako izgleda epruveta u kidalici.



*Slika 7.8. Polaganje testne epruvete u prstene od kidalice*

### 7.3.2. Rezultati testiranja strojnog dijela MJ.20-SI.71

Testni uzorci su obrađeni u epruvete u skladu sa normom DIN 50125 izrezivanjem iz zavarene ploče u kvadratni presijek. [27] Naknadno su istokareni u epruvete. Obradene su epruvete uvidane u prstene koji su dovidani u čeljusti kidalice kako je prikazano na slici 7.9. Uslijed djelovanja vlačnog naprezanja obje su epruvete pukle na rubovima, te su time potvrdile da zavar nije najslabija točka zavarenog spoja i zadovoljile normu. Naredne fotografije pokazuju epruvetu prije i nakon testova. Na slikama 7.10. I 7.11. jasno vidimo da su lomovi nastali na rubovima testnih epruveta.



*Slika 7.9. Testna epruveta u kidalici spremna za test*



*Slika 7.10. Testna epruveta 1 nakon testa vlačne čvrstoće*



*Slika 7.11. Testna epruveta 1 nakon testa vlačne čvrstoće*

## 8. ZAKLJUČAK

Zavarljivost, zakaljivost i prokaljivost su osnovna svojstva koja opisuju koliko je neki metal zavarljiv, svaki zavareni spoj ima mikrostrukturu koja je podijeljena u zonu utjecaja topline i zonu taljenja. Na sam proces zavarivanja (nastajanja zavarenog spoja) utječu mnogi faktori kao što su dovođenje i odvođenje topline, jakost struje i brzine zavarivanja, sama zaštita osnovnog i dodatnog metala, značajke dodatnog i osnovnog metala, plinovi iz atmosfere koji ulaze u rastaljeni metal, te količina i oblik kojim se prenosi rastaljeni metal. Ako želimo postići zadovoljavajući zavar onda se moramo adekvatno pripremiti žlijeb, odraditi tip zavarenog spoja (ovisno o debljini i tehničkim zahtjevima spoja), te definirati redosljed polaganja zavara.

Dimenzije žlijeba trebaju omogućiti minimalan otvor (zbog što manjih troškova dodatnog materijala a da postižu kvalitetan zavareni spoj). Najšire korišteni tipovi zavarivanja su - MIG/MAG zavarivanje (sa zaštitnim plinom), REL (ručno-elektrolučno) zavarivanje sa obloženim elektrodama, TIG zavarivanje (zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina). Način zavarivanja odabiremo sukladno o tehničkim kriterijima zavara. Najčešće pogreške do kojih dolazi u zavarenom spoju su:

1. Pukotine - javljaju se zbog nečistoće osnovnog i dodatnog materijala, kao i nepravilnog odvođenje topline
2. Poroznost ili pojava napuklina plinskih pora - nastaju zbog zarobljenog plina za vrijeme skrućivanja u metalu
3. Uključine - posljedica zaostajanja nečistoća i drugih čestica koje se nakupe u metalu (na šavu), dijelimo ih u uključine troske, praška i oksida
4. Nedovoljno protaljivanje između metala zavara i osnovnog metala ili pojedinih zavara u šavu
5. Raznolike nepravilnosti oblika

Kvalitetu zavarenog spoja provjeravamo ispitivanjima koja su definirana u HRN EN ISO 15614 i HRN EN ISO 9806 normama. Ispitivanja se dijele u metode ispitivanja sa i bez razaranja spoja. Najčešći načini ispitivanja bez razaranja su vizualna inspekcija, provjera nepropusnosti, provjera radiografskim ili rendgenskim snimanjem, ultrazvučna provjera, te provjera penetrantskim tekućinama. Najčešće metode ispitivanja sa razaranjem su test savijanja, ispitivanje tvrdoće,

makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje te vlačni test. Strojnog dio MJ.20-SI.71 se je ispitivao sukladno normama HRN EN ISO 15614 i HRN EN ISO 9806. Korištene metode test savijanja i test vlačne čvrstoće dali su zadovoljavajuće rezultate. Na testu savijanja nije došlo do pukotina većih od 3 mm, a na testu vlačne čvrstoće epruveta nije pukla na zavaru, već na njenim rubovima.



## Sažetak

Tema ovog rada bila je testiranje strojnog dijela MJ.20-SI.71 te je u svojoj cjelosti obradila problematiku analize kvalitete zavarivanja. Osim pregleda teorijskih osnovi zavarivanja, pripreme i samog provođenja zavarivanja (kao i najčešće korištenih metoda), ovaj je rad dao i uvid u utjecaj ovog načina spajanja materijala na njihovu strukturu, te razradio metode ispitivanja kvalitete zavarenog spoja. Odabrane metode primjenile su se na predmetu testiranja, te su detaljno opisane, uz navedene rezultate ispitivanja i njihove zaključke. Oba su testa polučila zadovoljavajuće rezultate.

Ključne riječi: zavarivanje, kontrola kvalitete zavarivanja, test savijanja, test vlačne čvrstoće, HRN EN ISO 15614, HRN EN ISO 9806.

# Summary

The main assignment of this finishing thesis was to test the performance of the MJ.20-SI.71 weld and analyse its quality. This thesis also provides a theory background of welding, welding quality control, the influence of welding on the base metal, as well as metallurgy in general. Two standards - normes HRN EN ISO 15614, HRN EN ISO 9806 were used to test the quality of the mentioned weld. Both methods used are described in detail, as well as the results and conclusions of the tests. In conclusion - both welds were properly made and provided pleasing results.

Keywords: welding quality assessment, tensile bend test, Transverse side bend test, HRN EN ISO 15614, HRN EN ISO 9806.

# Literatura

- [1] - prof Duško Pavletić, Bilješke i predavanja sa kolegija Zavarivanje,
- [2] Bajić, B.: „Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa MIG – MAG“, Gorenje-Varstroj – Lendava, M. Sobota, 1988.
- [3] - Samardžić, I.: „Termini i definicije kod zavarivanja“, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2012.
- [4] - časopis Zavarivanje 1966, Metalurgija Zavarivanja
- [5] - British Standards Institution, 1992, Imperfections in Metallic Fusion Welds, with Explanations
- [6] - Batić Selma, Greške u zavarenim spojevima 2016.
- [7] - Kontrola kvalitete nakon zavarivanja" Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
- [8] - EN 910, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials - Bend Tests, 2007
- [9] - Kolegij "Nauka o čvrstoći I", Tehnički Fakultet Rijeka, 2012.
- [10] Vasić, P.; Arsenijević, M.: „Ispitivanje materijala“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1962.
- [11] ISO 15614-1, 2004.
- [12] Riebensahm, P.: „Ispitivanje materijala“, Hrvatska redakcija ministarstva industrije, Zagreb, 1948
- [13] EN 26520:1992

## Popis slika

Slika 2.1. Potrebna oprema za formiranje električnog luka pri ručno-elektrolučnom zavarivanju, preuzeto s <https://tsi.webador.com/tois-2-1-2-elektrolucno-zavarivanje>

Slika 2.2. Promjena sturkture zavara porastom temperature, preuzeto s <https://docplayer.rs/198953146-Analiza-svojtava-zavarenog-niskougliji%C4%8Dnog-%C4%8Delika.html>

Slika 2.3. Prikaz zone utjecaja topline, preuzeto s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zona\\_utjecaja\\_topline](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zona_utjecaja_topline)

Slika 3.1. Križni, kutni rubni i prirubni spoj, preuzeto s <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>

Slika 3.2. Detlajni prikaz dijeova žlijeba, preuzeto s <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>

Slika 4.1. Potrebna oprema za provođenje MIG-MAG zavarivanja, preuzeto s [https://www.wikiwand.com/hr/Zavarivanje\\_MIG\\_postupkom](https://www.wikiwand.com/hr/Zavarivanje_MIG_postupkom)

Slika 4.2. Potrebna oprema za provođenje TIG zavarivanja, preuzeto s <https://weldguru.com/tig-welding/>

Slika 4.3. Potrebna oprema za provođenje REL zavarivanja, preuzeto s <https://www.masinskiprirucnik.com/rucno-elektrolucno-zavarivanje-oblozenom-elektrodom-rel-uvod/>

Slika 5.1. Promjena sturkture zavara porastom temperature, preuzeto iz Metalurgija Zavarivanja, časopis Zavarivanje 1966

Slika 5.2. Prikaz zone utjecaja topline, kolegij Zavarivanje

Slika 5.4. Rendgenska snimka poroznosti, preuzeto s interneta

Slika 5.5. Prikaz nedovoljnog protlačivanja, kolegij Zavarivanje

Slika 5.6. Prikaz nepravilnosti oblika - ugorina i zajeda, kolegij Zavarivanje

Slika 6.1. Inspekcija zavara rendgenskim zrakama, preuzeto s internet

Slika 6.2. Inspekcija zavara rendgenskim zrakama, preuzeto s internet

Slika 6.3. Inspekcija zavara rendgenskim zrakama, kolegij Zavarivanje

Slika 6.4. Charpyjev Bat, preuzeto s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Charpyjevo\\_klatno](https://hr.wikipedia.org/wiki/Charpyjevo_klatno)

Slika 6.5. Izvedbe testa savijanja, preuzeto s

[https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-view-of-a-bend-test-a-and-an-overview-procedure-of-the-free-formed-bending\\_fig1\\_272349125](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-view-of-a-bend-test-a-and-an-overview-procedure-of-the-free-formed-bending_fig1_272349125)

Slika 6.6. Vlačni test, preuzeto s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vla%C4%8Dno\\_ispitivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vla%C4%8Dno_ispitivanje)

Slika 6.7. Hookeov dijagram [https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram\\_naprezanja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja)

Slika 7.1. Primarna priprema zavara za test

Slika 7.2. Narezani uzorci

Slika 7.3. Pripremljeni uzorci spremni za test

Slika 7.4. Početak testa savijanja

Slika 7.5. Savijanje uzorka 1

Slika 7.6. Savijanje uzorka 2

Slika 7.7. Savijeni uzorci su nemaju većih pukotina u usporedbi sa napuknutim primjerom uzorka sa drugog zavara

Slika 7.8. Polaganje testne epruvete u prstene od kidalice

Slika 7.9. Testna epruveta u kidalici spremna za test

Slika 7.10. Testna epruveta 1 nakon testa vlačne čvrstoće

Slika 7.11. Testna epruveta 1 nakon testa vlačne čvrstoće