

# Analiza zahtjeva norme HRN EN 13134 za kvalifikaciju postupka tvrdog lemljenja

---

**Loborec, Mihael**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2025**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:896294>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mihael Loborec**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Mihael Loborec

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija.

Mihael Loborec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mihael Loborec** JMBAG: **0035233657**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza zahtjeva norme HRN EN 13134 za kvalifikaciju postupka tvrdog lemljenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of requirements in standard HRN EN 13134 for the qualification of brazing procedure**

Opis zadatka:

Prilikom dokazivanja sposobnosti procesa lemljenja nužno je provesti cijeli niz razornih i nerazornih ispitivanja. Lemljenje, je kao postupak spajanja, ravnopravno zavarivanju iako se u praksi često zadržava stav da nije potrebno provoditi nikakva ispitivanja što može imati teške posljedice na pouzdanost i kvalitetu proizvoda. U teorijskom dijelu dati pregled postupaka tvrdog lemljenja te njihovu podjelu sukladno normi HRN EN ISO 4063. Proučiti i analizirati zahtjeve za ispitivanjima u normi HRN EN 13134 i odrediti ključne kriterije prihvatljivosti zalemljenog proizvoda. Posebno obraditi vrste lemova i talila ovisno o osnovnom materijalu.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućem zalemljenom proizvodu provesti sva ispitivanja, ovisno o konfiguraciji spoja a prema zahtjevima HRN EN 13134. Klasificirati uočene nepravilnosti i odrediti njihov utjecaj na pouzdanost spoja. Zaključiti o prihvatljivosti kvalificirane tehnologije te dati preporuke za poboljšanje sljedivosti tehnologije lemljenja u proizvodnji.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

**1. rok:** 20. i 21. 2. 2025.  
**2. rok:** 10. i 11. 7. 2025.  
**3. rok:** 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 24. 2. – 28. 2. 2025.  
**2. rok:** 15. 7. – 18. 7. 2025.  
**3. rok:** 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Ivice Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Damir Godec

## Sadržaj

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1 Uvod.....	1
2 Teorijska osnova o tvrdom lemljenju .....	2
2.1 Osnovni opis procesa tvrdog lemljenja .....	3
2.2 Usporedba mekog i tvrdog lemljenja .....	4
2.3 Usporedba tvrdog lemljenja i zavarivanja.....	5
2.4 Odabir materijala kod tvrdog lemljenja .....	6
2.4.1 Odabir osnovnog materijala .....	6
2.4.2 Podjela postupaka tvrdog lemljenja .....	9
2.4.3 Prednosti i ograničenja tvrdog lemljenja.....	10
3 Postupci provedbe tvrdog lemljenja .....	12
3.1 Čišćenje i priprema površine.....	12
3.1.1 Proces kemijskog čišćenja.....	13
3.1.2 Proces mehaničkog čišćenja.....	14
3.1.3 Procesi toplinskih čišćenja .....	15
3.1.4 Predpremaži i završni sloj .....	15
3.2 Metode zagrijavanja .....	16
3.2.1 Plinsko tvrdo lemljenje.....	17
3.2.2 Tvrdo lemljenje u peći.....	19
3.2.3 Indukcijsko lemljenje .....	20
3.2.4 Lemljenje uranjanjem.....	21
3.2.5 Elektrootporno tvrdo lemljenje .....	22
3.2.6 Zavarivačko lemljenje .....	24
3.2.7 Ostali procesi.....	25

---

3.3	Tipovi spojeva u tvrdom lemljenju .....	25
3.4	Uloga i primjena talila.....	27
3.4.1	Talila za primjenu kod visokih temperatura - FH talila.....	28
3.4.2	Vrsta talila .....	30
3.4.3	Oblici, metode upotrebe i uklanjanje talila .....	31
4	Analiza norme HRN EN 13134:2001 .....	33
4.1	Nerazorna ispitivanja tvrdo lemljenog spoja.....	33
4.1.1	Vizualna kontrola .....	34
4.1.2	Ultrazvučna metoda.....	36
4.1.3	Radiografska metoda.....	37
4.1.4	Metoda ispitivanja penetrantima .....	38
4.1.5	Metoda ispitivanja propusnosti .....	40
4.1.6	Metoda ispitivanja opterećenjem .....	40
4.1.7	Termografska metoda .....	41
4.2	Razorna ispitivanja tvrdo lemljenih spojeva .....	42
4.2.1	Smično ispitivanje .....	42
4.2.2	Vlačno ispitivanje.....	44
4.2.3	Metalografska ispitivanja .....	45
4.2.4	Ispitivanje tvrdoće .....	45
5	Ekperimentalni dio.....	47
5.1	Osnovne informacije o uzorku .....	47
5.2	Analiza makroizbruska/makrostrukture .....	49
5.2.1	Mogući ostaci talila .....	50
5.2.2	Vidljive nepravilnosti i nedostaci .....	51
5.2.3	Kontinuitet lemljenog spoja .....	52
5.2.4	Udubljeni korijen šava .....	52
5.2.5	Višak dodatnog materijala .....	53
5.3	Zaključak provedene analize .....	54
6	Zaključak.....	55
7	Literatura .....	56

**POPIS SLIKA**

Slika 1 Naprava za stezanje [14] .....	17
Slika 2 Ručno lemljenje plinskim plamenom [15].....	17
Slika 3 Tvrdo lemljenje plamenom [15].....	18
Slika 4 Tvrdo lemljenje u peći [16].....	19
Slika 5 Posebno dizajnirana zavojnica za lemljenje aluminija [17].....	21
Slika 6 Elektrootporno lemljenje [18].....	23
Slika 7 Vrste spojeva u tvrdom lemljenju [19].....	25
Slika 8 Oprema kod ultrazvučne metode [21].....	36
Slika 9 Prikaz pukotina sa penetrantskim sredstvima [20] .....	39
Slika 10 Dva različita tipa ispitnih uzoraka [12].....	43
Slika 11 Ispitni uzorak kod vlačnog ispitivanja [12].....	44
Slika 12 Potrebni podaci prije ispitivanja .....	48
Slika 13 Postupak lemljenja uzorka .....	49
Slika 14 Makroizbrusak na kojem se vrši vizualni pregled .....	50
Slika 15 Unutarnja i vanjska površina uzorka.....	51
Slika 16 Pronađene greške na uzorcima.....	51
Slika 17 Uzorci sa kontinuiranim lemljenim spojem .....	52
Slika 18 Usporedba nepravilno oblikovanog korijena (lijevo) i pravilno oblikovanog (desno) .....	53
Slika 19 Prednja strana uzorka .....	53



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Usporedba različitih procesa spajanja materijala .....	2
Tablica 2 Usporedba tvrdog i mekog lemljenja.....	4
Tablica 3 Usporedba tvrdog lemljenja i zavarivanja .....	5

**POPIS KRATICA**

CABW - elektrolučno zavarivačko lemljenje sa ugljičnom elektrodom

EN - europska norma

FH (*eng. flux high-temperature*) - talila koja se koriste za lemljenje pri visokim temperaturama

FL (*eng. flux low-temperatures*) - talila koja se koriste za lemljenje pri niskim temperaturama

GMAW - elektrolučno zavarivanje taljivom kontinuiranom elektrodom u zaštitnoj atmosferi

GTAW - elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom

HVAC - (*eng. Heating Ventilation and Air Conditioning*) - grana industrije koja se bavi grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom

HRN - hrvatska norma

ISO (*eng. International Organization for Standardization*) - međunarodna organizacija za normizaciju

NDT (*eng. Non Destructive Testing*) - Nerazorne metode ispitivanja kvalitete

OFW - plinsko zavarivanje kisikom i gorivim plinom

PAW - plazma zavarivanje

SMAW - elektrolučno zavarivanje taljivom obloženom elektrodom

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis</b>
P	Watt [W]	Električna snaga
I	Amper [A]	Električna struja
R	Ohm [ $\Omega$ ]	Električni otpor
p	Bar	tlak
$\phi$	mm	promjer

## **SAŽETAK**

Ovaj rad obrađuje temu izrade nerastavljivih spojeva, s posebnim naglaskom na lemljenje kao ključnu tehniku spajanja komponenti u strukturno čvrste i sigurne proizvode. Detaljno su obrađene karakteristike tvrdog lemljenja, koja se danas koristi u zrakoplovstvu, automobilskoj industriji i elektronici, zbog čega je jedna od ključnih tehnologija modernog doba. Obrađene su i sve faze provođenja postupka tvrdog lemljenja. Dan je pregled normativnih postupaka ispitivanja kvalitete spojeva izrađenih postupkom tvrdog lemljenja.

Cilj ovoga rada je detaljno analizirati tvrdo lemljenje, objasniti postupke, alate te norme i ispitivanja koji osiguravaju kvalitetu spojeva i omogućuju identifikaciju grešaka u procesu. U eksperimentalnom dijelu rada, provedeno je ispitivanje kvalitete lemljenih spojeva metodom pregleda slika presjeka uzoraka na makroizbruscima kako bi se ustanovili nedostaci i greške na spoju. te je dana ocjena o zadovoljavanju kvalitete konačnog spoja.

**Ključne riječi:** tvrdo lemljenje, ispitivanje kvalitete, norma.

## **SUMMARY**

This paper addresses the topic of creating permanent joints, with a particular focus on brazing as a key technique for joining components into structurally strong and safe products. The characteristics of hard brazing are thoroughly examined, highlighting its modern applications in aerospace, automotive, and electronics industries, making it one of the essential technologies of today. All stages of the brazing process are discussed, along with an overview of standardized quality testing procedures for joints made using this technique.

The aim of this paper is to analyze brazing in detail, explain the procedures, tools, standards and tests that ensure the quality of the joints and enable the identification of errors in the process. In the experimental part of the paper, the quality of the brazed joints was tested by examining cross-sectional images of samples on macro-grinds in order to identify defects and errors in the joint. and an assessment of the satisfactory quality of the final joint was given.

**Keywords:** brazing, Quality testing, Standard.

# 1 Uvod

Proizvodi koji se sastoje od dviju i više pojedinačnih komponenti često su povezani nerastavljivim spojevima odnosno povezane su trajno kako bi se stvorio strukturno čvrst i siguran proizvod za upotrebu. Pojam nerastavljivi spoj se odnosi na sve spojeve kod kojih prilikom rastavljanja obavezno dolazi do oštećenja osnovnog materijala. Tim pojmom je obuhvaćen veliki broj postupaka od kojih su u okviru ovog rada posebno zanimljivi zavarivanje i lemljenje. Osnovna razlika između ta dva postupka spajanja je temperatura pri kojoj se ostvaruje nerastavljiv spoj, pri tome je još važno istaknuti da se zavarivanje može odvijati bez dodatka drugog materijala, a ako se dodaje novi materijal potrebno je rastaliti i osnovni i dodatni materijal kako bi se stvorio homogeni nerastavljivi spoj. Za razliku od toga kod lemljenja se obavezno koristi dodatni materijal čija temperatura tališta je uvijek niža od temperature tališta osnovnog materijala i dobiva se heterogeni spoj. Lemljenje može biti tvrdo ili meko, što će biti objašnjeno kasnije. [1,2]

Tvrdo lemljenje jedno je od najstarijih tehnika spajanja materijala s poviješću koja počinje još u drevnim civilizacijama kao što su Egipat ili Mezopotamija koje su koristile tvrdo lemljenje za izradu skupocjenog nakita ili ukrasa. Tijekom srednjeg vijeka ova tehnika se koristila za izradu oružja i umjetnina, dok je industrijska revolucija značila početak široke primjene ove tehnike u strojarstvu. U 20. stoljeću pa sve do danas tvrdo lemljenje je pronašlo svoju primjenu u zrakoplovstvu, automobilskoj industriji i elektronici te ga to čini jednom od važnijih tehnologija današnjice. [1,2]

Cilj ovog završnog rada je analizirati tvrdo lemljenje te detaljnije objasniti postupke i alate kojima se taj proces provodi. Glavni je zadatak istaknuti primjenu relevantnih normi i metoda ispitivanja koje osiguravaju kvalitetu, olakšavaju prepoznavanje potencijalnih grešaka u procesu lemljenja i omogućuju završnu kontrolu spojeva u konstrukciji. U eksperimentalnom će se dijelu rada provesti pregled uzoraka zalemljenih spojeva prema normi HRN EN 13134, pri čemu će se koristiti brza i ekonomična metoda analize makroizbrusaka radi identificiranja nedostataka i grešaka na spoju. Smisao eksperimenta jest potvrditi spomenutu učinkovitost metodologije i pokazati njezinu primjenjivost na konkretnom primjeru. Rezultat će biti donošenje zaključka o stanju spojeva prema zadanoj normi.

## 2 Teorijska osnova o tvrdom lemljenju

Dvije su osnovne metode spajanja materijala – lemljenje i zavarivanje. Zavarivanje je postupak kod kojeg obavezno dolazi do taljenja oba materijala koji sudjeluju u spoju. Lemljenje se dijeli na meko lemljenje i tvrdo lemljenje kod kojih je glavna razlika temperatura na kojoj se odvija spajanje. Meko lemljenje se odvija na temperaturama ispod 450°C. Tvrdo lemljenje je način spajanja osnovnog materijala uz prisustvo dodatnog materijala čija likvidus točka je iznad 450°C i ispod solidus točke osnovnog materijala (likvidus označava temperaturu iznad koje je materijal potpunom tekućem stanju, a solidus označava temperaturnu točku do koje je materijal u čvrstom stanju). Glavne razlike u spomenutim postupcima sažeto su predstavljene u Tablici 1.

Tablica 1 Usporedba različitih procesa spajanja materijala [1]

Parametar	Proces		
	Meko lemljenje	Tvrdo lemljenje	Zavarivanje
Talište dodatnog materijala	<450°C	>450°C, ali niža od tališta osnovnog materijala	>450°C, niža ili jednaka temperaturi taljenja osnovnog materijala
Osnovni materijal	Ne tali se	Ne tali se	Tali se
Korištenje talila kako bi se zaštitila površina osnovnog materijala i pomoglo kvašenje spojne površine	Koristi se	Nije nužno, opcionalno	Nije nužno, opcionalno
Izvor topline	Lemilica, ultrazvučno, električni otpor, peć	Peć, kemijska reakcija, indukcija, infracrveno, plamenik	Plazma, elektro otporno, elektrolučno, laserski
Skлонost deformiranju ili gorenju	Netipično	Netipično	Potencijalno iskrivljenje i izobličenje osnovnog materijala, sklono gorenju
Zaostala naprežanja	Nema	Nema	Okolo mjesta zavora

## 2.1 Osnovni opis procesa tvrdog lemljenja

Tvrdo lemljenje (engl. *Brazing*) je postupak spajanja dvaju ili više radnih komada uz prisutnost dodatnog materijala (lema) koji se tali na temperaturama iznad 450°C, ali ima niže talište od tališta osnovnih materijala. Prilikom tvrdog lemljenja temperatura sklopa koji se tvrdo lemi je zagrijana do temperature iznad 450°C odnosno do točke u kojoj se dodatni materijal rastali i ispunjava zazor kapilarnim djelovanjem između osnovnih materijala. Prilikom hlađenja spoja lem koji je ispunio sve dodirne površine veže se s osnovnim materijalom difuzijom te tako ostvaruje metaluršku vezu. To znači da je temperatura bila dovoljno visoka da dođe do određene razmjene atoma između dodatnog i osnovnog materijala te se tako povećava čvrstoća. Spoj koji je tvrdo zalemljen ostvaruje hermetička svojstva pa je zbog toga pogodan za različite namjene gdje je potrebno osigurati nepropusnost, pogotovo u nekim industrijama gdje se barata s korozivnim tekućinama jer spoj ima odlična svojstva antikoroziivnosti i dobro podnosi visoke temperature.[1]

Čimbenici koji su važni kod tvrdog lemljenja kako bi se osigurala čvrsta, kvalitetna i trajna veza su: oblik spoja, odabir osnovnih materijala i dodatnih materijala, odabir temperature i sredstva zagrijavanja, korištenje talila i (ako je potrebno) zaštitne atmosfere, kapilarno djelovanje, hlađenje i završna obrada te samo radno okruženje gdje se spoj koristi. Kombinacija ovih čimbenika određuje konačna mehanička, termička i kemijska svojstva zalemljenog spoja. Razumijevanje i kontrola svakog aspekta procesa tvrdog lemljenja ključni su za postizanje visokokvalitetnih i trajnih spojeva.[1]

Spojevi koji su spojeni postupkom tvrdog lemljenja imaju vrlo visoku čvrstoću. Metalurška veza ovog spoja je takva da spoj koji je ispravno dizajniran i izveden ima čvrstoću veću ili jednaku kao i osnovni materijal. Tijekom tvrdog lemljenja na spoju dodatni materijal poprima zaobljen oblik zbog njegovih svojstava u tekućem stanju, što je poželjno jer osigurava otpornost spoja na zamor. Time se materijal ravnomjerno prelijeva preko kutova i spojnih sekcija, poboljšavajući mehaničku čvrstoću i trajnost spoja. Vrlo komplicirani oblici mogu se spojiti s vrlo malo deformacije, a precizno spajanje je prilično lako, za razliku od zavarivanja kod kojeg se unosi vrlo velika količine topline što može uzrokovati zaostala naprezanja i izobličenja.[4]



## 2.2 Usporedba mekog i tvrdog lemljenja

Tvrdo i meko lemljenje su prilično slični procesi, iako imaju i važne razlike. Obje metode spajaju osnovne materijale dodatnim materijalom koji se tali, obje metode koriste kapilarno djelovanje kako bi rastaljeni lem ispunio razmak između osnovnih materijala i obje metode koriste talilo kako bi se spriječila oksidacija materijala pri višim temperaturama i osigurala dovoljno kvašenje materijala za lemljenje. Glavne razlike prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2 Usporedba tvrdog i mekog lemljenja [1]

Karakteristika	Tvrdo lemljenje	Meko lemljenje
Temperatura	>450°C	<450°C
Lem/dodatni materijal	Legure bakra, srebra, nikla	Legure kositra, olova, cinka
Čvrstoća spoja	Visoka – usporediva s osnovnim materijalima	Niža – dovoljna za elektroničke i lagane spojeve
Otpornost na temperaturu	Spojevi otporni na visoke temperature	Spojevi otporni na niže temperature
Primjena	Industrijske primjene HVAC ( <i>eng. Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i> ), automobilska industrija, itd.	Elektronika, niskotlačni sustavi
Metoda grijanja	Plamenik, peć, indukcijsko grijanje, itd.	Lemilica, peć
Estetika spoja	Glatki spojevi kod kojih se traži visoka kvaliteta završne obrade	Spojevi kod kojih kvaliteta završne obrade nije važna

Iako obje metode lemljenja koriste slične principe spajanja, tvrdo lemljenje se preferira u primjenama koje zahtijevaju visoku mehaničku i termičku otpornost, dok mekano lemljenje nalazi primjenu u spojevima koji ne podliježu visokim opterećenjima. Pravilna selekcija metode lemljenja ključna je za postizanje optimalnih svojstava spoja, uzimajući u obzir specifične radne uvjete i zahtjeve.[2]

## 2.3 Usporedba tvrdog lemljenja i zavarivanja

Spomenute metode nisu tako slične kao tvrdo i meko lemljenje, već imaju puno više razlika. Njihova primarna funkcija je ista, obje metode se koriste za trajno spajanje dijelova u industrijama poput: automobilske, zrakoplovne i građevinske, ovisno o zahtjevima za čvrstoćom i trajnošću finalnog proizvoda. Obje metode mogu se koristiti u zahtjevnim eksploatacijskim uvjetima, naravno ovisno o izboru materijala. Kod zavarivanja je vrlo teško spajati različite osnovne materijale, a kod tvrdog lemljenja je moguće ostvariti spoj dva ili više različitih osnovnih materijala. U obje metoda najvažniji čimbenik je temperatura, odnosno zagrijavanje, kako bi se stvorila metalurška veza. Budući da se u obje metode spajanje odvija na visokim temperaturama obje metode koriste zaštitno sredstvo protiv oksidacije.

Tablica 3 Usporedba tvrdog lemljenja i zavarivanja [1]

Karakteristika	Tvrdo lemljenje	Zavarivanje
Temperatura	< Talište osnovnih materijala (450°C – 1000°C)	> Talište osnovnih materijala
Taljenje osnovnih materijala	Osnovni materijal se ne tali	Osnovni materijal se tali
Materijal za spajanje	Legura za lemljenje (srebro, bakar, nikal)	Nema dodatnog materijala ili žica/elektroda za zavarivanje
Kapilarno djelovanje	Osnovni princip za popunjavanje spoja	Nema kapilarnog djelovanja
Mehanička čvrstoća spoja	Najčešće odgovara čvrstoći osnovnog materijala	Vrlo visoka, pogodna za strukture koje se nalaze pod znatnim opterećenjem
Otpornost na temperaturu	Ograničena do radnih temperatura legure	Pogodna u svim temperaturnim okruženjima
Primjena	Pogodno za tanke materijale, osjetljive komponente i precizne spojeve	Pogodno za mehanički opterećene dijelove i visoke temperature
Potreba za obradom	Najčešće nije potrebna naknadna obrada spoja	Spojevi mogu zahtijevati brušenje ili dodatnu obradu

Mnogobrojne prednosti tvrdog lemljenja čine ga vrlo dobrim izborom za spajanje materijala, od kojih su najvažniji: čvrsti spojevi koji su usporedivi sa zavarivanjem, ali bez taljenja osnovnog materijala; sposobnost spajanja različitih materijala što nije moguće kod zavarivanja; dobiveni spojevi su estetski privlačniji jer nema promjene boje; deformacije na mjestu lemljenja su manje u usporedbi sa zavarivanjem; zbog precizne kontrole temperature i niže temperature spajanja u odnosu na zavarivanje rizik za zaostale i toplinske deformacije je minimalan; upravo zbog niske temperature pogodan je za spajanje tankih materijala. Tvrdo lemljenje je brz i ekonomičan način spajanja te je vrlo koristan zbog različite primjene u industrijama s velikom serijskom proizvodnjom.[2]

## 2.4 Odabir materijala kod tvrdog lemljenja

### 2.4.1 Odabir osnovnog materijala

Odabir osnovnog materijala ključan je za postizanje kvalitetnog spoja u procesu tvrdog lemljenja. S obzirom na to da osnovni materijali ne prelaze svoju temperaturu tališta tijekom lemljenja, njihova svojstva, poput metalurške kompatibilnosti, toplinske vodljivosti i mehaničke čvrstoće, igraju ključnu ulogu u konačnim svojstvima spoja. Faktori za odabir osnovnog materijala su [2]:

**Metalurška kompatibilnost:** osnovni materijali moraju biti kompatibilni s dodatnim materijalom za lemljenje kako bi se osiguralo dobro kvašenje i formiranje čvrstog spoja. Na primjer, nehrđajući čelik, bakar, aluminij i legure nikla često se koriste zbog njihove kompatibilnosti s raznim legurama za lemljenje.

**Toplinska vodljivost i ekspanzija:** materijali s visokom toplinskom vodljivošću, poput bakra, brzo provode toplinu, što može zahtijevati prilagođene metode zagrijavanja kako bi se postigla jednolika temperatura spoja. S druge strane, razlike u koeficijentima toplinske ekspanzije između osnovnih materijala mogu uzrokovati naprezanja i pukotine tijekom hlađenja.

**Mehanička svojstva:** čvrstoća, tvrdoća i otpornost na trošenje osnovnih materijala izravno utječu na dugotrajnost spoja. Kod primjena koje podliježu velikim mehaničkim opterećenjima, poput dijelova u zrakoplovnoj ili automobilskoj industriji, biraju se materijali s visokom čvrstoćom.

**Otpornost na koroziju i okolišne uvjete:** osnovni materijali moraju biti otporni na specifične radne uvjete, uključujući vlagu, kemikalije i visoke temperature. Nehrđajući čelik i aluminij često se koriste u uvjetima gdje je potrebna visoka otpornost na koroziju.

**Svojstva materijala u obradi:** Osnovni materijali moraju biti jednostavni za obradu i spajanje. Na primjer, aluminij zahtijeva posebne postupke zbog svoje sklonosti stvaranju oksidnog sloja koji može otežati lemljenje.

**Ekonomska isplativost:** Odabir osnovnog materijala također ovisi o ekonomskim aspektima. Jeftiniji materijali, poput čelika, često se koriste u masovnoj proizvodnji, dok se skuplje legure koriste u specijaliziranim primjenama.

Za odabir dobrog osnovnog materijala najvažnije je poznavanje njihovih svojstava. Metali se prema svojstvima dijele u osnovne grupe: čelik i njegove legure, bakar i legure bakra, aluminij i legure, nikal i legure te plemeniti metali. [1, 2]

## Čelik i legure čelika

**Ugljični čelik i nisko legirani čelik:** Spadaju u grupu koja sadrži manje od 0,10 % ugljika. Često se koristi zbog svoje čvrstoće i jednostavnosti obrade. Uobičajene primjene uključuju strojogradnju i građevinsku industriju. Lem na bazi srebra koji sadrži nikal obično pruža bolju sposobnost kvašenja i preferira se za lemljenje određenih nisko legiranih čelika gdje je čvrstoća spoja najvažnija. Lem na bazi bakra i bakrenih legura primarno se koristi za prethodno postavljanje u pećima s kontroliranom atmosferom. Organske i anorganske nečistoće moraju se ukloniti s područja koja će se lokalno lemiti. [1, 2]

**Nehrđajući čelik:** svim nehrđajućim čelicima zajedničko je da su legure na bazi željeza koje sadrže krom te se koriste u uvjetima gdje je otpornost na koroziju ključna, poput prehrambene i kemijske industrije. Nehrđajući čelici prema mikrostrukturi i kemijskom sastavu mogu se podijeliti u 5 kategorija: Austenitni čelici, Feritni čelici, Martenzitni čelici, Percipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici, Duplex nehrđajući čelici. Njihova metalurška kompatibilnost s legurama na bazi srebra i nikla čini ih idealnim za tvrdo lemljenje. Nehrđajući čelici zahtijevaju strože čišćenje površine u usporedbi s ugljičnim čelicima. [1, 2]

**Alatni čelik:** Koristi se za primjenu koje zahtijevaju visoku otpornost na trošenje i toplinska opterećenja. Za postupak lemljenja je pogodno grupirati alatne čelike u dvije kategorije: ugljični alatni čelici koji svoju visoku tvrdoću postižu visokim udjelom ugljika i hlađenje nadkritičnom

brzinom, a moguće ih je legirati kako bi im se poboljšala svojstva; te brzorezni alatni čelici koji sadrže manji postotak ugljika od ugljičnih alatnih čelika, a svoja svojstva postižu dodavanjem legiranih elemenata (npr. volfram, molibden, vanadij, krom i ostali). Osnovni materijali moraju biti čisti, bez oksida i organskih onečišćivala kako bi se ostvario dobar protok dodatnog materijala. [1, 2]

### **Bakar i legure bakra**

**Bakar:** Zahvaljujući visokoj toplinskoj i električnoj vodljivosti, bakar je ključan u električnoj i HVAC industriji. Međutim, zbog njegove sklonosti oksidaciji pri visokim temperaturama, često se koristi talilo ili zaštitna atmosfera tijekom lemljenja. [1, 2]

**Bronca i mjed:** Legure bakra često se koriste za dijelove izložene umjerenim mehaničkim i termičkim opterećenjima.

Konvencionalni postupci odmašćivanja rastvaračima ili alkalnim sredstvima pogodni su za čišćenje osnovnih materijala na bazi bakra. Mehaničke metode, poput četkanja žičanom četkom ili pjeskarenja mogu se koristiti za uklanjanje oksida. Potpuno kemijsko uklanjanje oksida zahtjeva pravilan izbor otopine za čišćenje. [1, 2]

### **Aluminij i legure aluminija**

Aluminij i njegove legure uspješno se mogu lemiti koristeći postupke slične onima za lemljenje drugih materijala, ali koriste se različita talila, dodatni materijali i općenito se lemi na nižoj temperaturi. Aluminij se može lemiti pomoću većine standardnih postupaka, uključujući lemljenje plamenom, uranjanjem i u peći. Lemljenje u peći može se obavljati u zraku ili u kontroliranoj atmosferi, uključujući vakuum.

Ne mogu se sve legure aluminija lemiti jer oksidni filmovi na njihovoj površini otežavaju kvašenje, a njihovo talište može biti niže od tališta dostupnih materijala za lemljenje. Zahtjevi za prethodnim čišćenjem značajno se razlikuju ovisno o metodi lemljenja, stanju metalnih površina i vrsti prisutnih onečišćenja. [1, 2]

## **Nikal i legure nikla**

Legure na bazi nikla koriste se u primjenama koje zahtijevaju visoku otpornost na oksidaciju i koroziju pri visokim temperaturama, poput zrakoplovne i energetske industrije. Nikal ima odličnu kompatibilnost s legurama za lemljenje koje sadrže bor ili fosfor. Čišćenje legura nikla neposredno prije lemljenja ključno je jer su ove legure osjetljive na kontaminaciju elementima niskog tališta, poput olova i sumpora, koji pri visokim temperaturama mogu oslabiti spoj i smanjiti njegovu otpornost. Materijal koji postane krhak zbog ovih elemenata ne može se popraviti. Oksidni filmovi koji nastaju na legurama nikla vrlo su čvrsti i žičana četka ih možda neće moći skroz ukloniti. Mogu se ukloniti brusnim papirom ili brušenjem. Ravnomjerno uklanjanje oksida kiselinom nije moguće očekivati ako legura nikla prvo nije temeljito očišćena od svih drugih stranih materijala. Proces čišćenja za legure nikla moraju biti temeljiti i slični su onima koji se koriste za druge metale. [1,2]

## **Plemeniti metali (zlato, srebro, platina)**

Ovi metali koriste se u aplikacijama koje zahtijevaju visoku otpornost na koroziju i estetski privlačne spojeve, poput nakita i medicinske opreme. Srebro, često korišteno kao legura za lemljenje, osigurava glatke i čvrste spojeve. Kao i kod svakog lemljenja, najbolji rezultati postižu se kada su dijelovi prethodno očišćeni. Materijali za nakit i dentalni materijali obično se odmašćuju, a ponekad i nagrizažu u razrijeđenim kiselinskim otopinama. [1, 2]

### **2.4.2 Podjela postupaka tvrdog lemljenja**

Norma HRN EN ISO 4063:2023 obuhvaća standardizirani sustav imenovanja procesa za zavarivanje i druge slične postupke, od kojih je svaki postupak označen svojim referentnim brojem. Jedna znamenka obuhvaća glavnu grupu postupaka, dvoznamenkastim brojem grupe i troznamenkastim brojem podgrupe. Identifikacijski broj za bilo koji postupak sadrži maksimalno tri znamenke. Ovaj sustav ima svrhu olakšavanja komunikacije, znači kako bi se osiguralo jednoznačno značenje u tehničkim dokumentima, za lakše uvođenje oznaka u digitalnim dokumentima kako bi se na svim mjestima nalazile iste oznake za istu grupu.[3]

Glavna oznaka grupe koja označava postupke lemljenja prema normi je broj 9, a u nju spadaju tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje.

Daljnje grupe i podgrupe prema normi HRN EN ISO 4063:2023 su:

- 91 Tvrdo lemljenje s lokalnim zagrijavanjem
- 911 Tvrdo lemljenje infracrvenim zračenjem
- 912 Plameno tvrdo lemljenje
- 913 Tvrdo lemljenje laserskom zrakom
- 914 Tvrdo lemljenje elektronskim mlazom
- 916 Indukcijsko tvrdo lemljenje
- 918 Elektrootporno tvrdo lemljenje
- 919 Difuzijsko tvrdo lemljenje
- 92 Tvrdo lemljenje s cjelovitim zagrijavanjem
- 921 Tvrdo lemljenje u peći
- 922 Tvrdo lemljenje u vakuumu
- 923 Tvrdo lemljenje uranjanjem u kupku
- 924 Tvrdo lemljenje u solnoj kupki
- 925 Tvrdo lemljenje u kupki s praškom
- 926 Tvrdo lemljenje potapanjem
- 93 ostali procesi tvrdog lemljenja

Postoje i ostale grupe i podgrupe ove norme i ove grupe koje nisu značajne za ovaj rad pa ih se neće obrađivati.

### 2.4.3 Prednosti i ograničenja tvrdog lemljenja

Spoj nastao tvrdim lemljenjem nije homogenizirani spoj jednolik po presjeku, već je heterogeni spoj koji se sastoji od različitih faza s različitim fizičkim i kemijskim svojstvima. Jednostavno rečeno, spoj se sastoji od dijelova osnovnog materijala koji se moraju spojiti i dodatnog materijala (lema) koji ih spaja. Međutim, djelomično otapanje osnovnog materijala, u kombinaciji s procesima difuzije, može promijeniti sastav i samim time kemijska i fizička svojstva granične zone formirane na spojnim površinama između osnovnog i dodatnog materijala, a često i svojstva cijelog spoja. Dakle uz dva različita materijala prisutna u spoju, u obzir se mora uzeti složena zona prijelaza ili potpuno drugačija zona s različitim karakteristikama od očekivanih.

Kada se želi izračunati čvrstoća spoja, treba uzeti u obzir da je spoj heterogeni pa pojednostavljeni koncept elastične i plastične teorije kojom se inače računa čvrstoća za metalna tijela ili spojeve koji su homogeni te na koja djeluju naprezanja, za njih ne vrijede. Budući da svaki od materijala kod tvrdog lemljenja može biti drugačiji pa su isto tako i karakteristike otpornosti na deformaciju i otpornosti na naprezanja u spoju nejednoliko raspoređena.

Tvrdo lemljeni spojevi iako imaju ograničenja na koja treba paziti, imaju mnogo više prednosti. Takav način spajanja je vrlo ekonomičan jer se s lakoćom mogu spajati kompleksni spojevi i različiti materijali. Spoj ima odlična svojstva kod raspodjele naprezanja i prijenosa topline. Spoj bi se mogao opisati kao čvrst, jednolik i nepropustan, može ga se izraditi brzo, jeftino pa čak i više spojeva odjednom. Tvrdom lemljenjem se mogu spajati čak i materijali koje nije moguće spajati drugim metodama, komplicirani sklopovi koji se sastoje od više materijala različite debljine ili različitog sastava koje bi bilo teško spojiti nekim drugim metodama. Tvrdo lemljenje može zamijeniti potrebu za lijevanjem određenih dijelova koji bi možda bili prekomplicirani za takvu vrstu obrade budući da zahtijevaju naknadnu obradu, što opet povećava cijenu. Upravo iz tih razloga i činjenice da tvrdo lemljeni spojevi imaju puno više prednosti nego nedostataka metoda tvrdog lemljenja se koristi u raznim industrijama.[2]



## 3 Postupci provedbe tvrdog lemljenja

Proces tvrdog lemljenja sastoji se od nekoliko važnih koraka koje potrebno dobro provesti kako bi se osigurala najbolja kvaliteta ostvarenog spoja. Ovo poglavlje obuhvaća kratki opis najvažnijih koraka kao što su upotreba naprava i držača, priprema i čišćenje površine, upotreba talila i odabir lema.

### 3.1 Čišćenje i priprema površine

Čista površina kod materijala koji se spajaju jedan je od ključnih elemenata za formiranje kvalitetnih i jednolikih spojeva kod procesa tvrdog lemljenja. Kako bi se poboljšao kapilarni efekt i smanjila mogućnost formiranja loših spojeva svi dijelovi i dodatni materijali morali bi biti očišćeni od masnoća, ulja, boja, bilo kakve prljavštine, oksida i kamenca koji se mogu nalaziti na materijalima prije lemljenja. Iako talila i zaštitne atmosfere za lemljenje mogu očistiti materijal do određenog stupnja to nije njihova glavna zadaća i nikako se ne bi smjeli koristiti kao zamjena za pravilne postupke čišćenja. Talila i zaštitne atmosfere se primjenjuju primarno za uklanjanje, prodiranje ili sprječavanje oksida na materijalu tijekom predgrijavanja i lemljenja, također za smanjenje površinske napetosti dodatnog materijala i stvaranje zaštitnog sloja očvrnulog spoja, a za čišćenje je bolje koristiti odgovarajuća sredstva. Efikasnost sredstva za čišćenje ovisi o vrsti metala, uvjetima okoline, načinu rukovanja dijelovima, uvjetima skladištenja i sličnim čimbenicima. Kako bi materijal ostao čisti nužno je postupak lemljenja provesti što je moguće brže nakon postupaka čišćenja materijala kako ne bi došlo do ponovne kontaminacije. Vrijeme skladištenja se mora odrediti za svaki dio posebno, a ono ovisi o vrsti materijala i o mjestu skladištenja gdje se materijal nalazi.[1]

Generalno čišćenje površine može se podijeliti na kemijsko i na mehaničko. Odabir postupaka čišćenja ovisi o vrsti onečišćujuće tvari, ovisi o metalu na kojem se provodi postupak lemljenja odnosno koji se čisti, zatim o potrebnoj razini čistoće potrebnoj za ostvarivanje spoja i samoj konfiguraciji dijela. Generalno procesi čišćenja koriste se za uklanjanje sljedećih tvari:

1. tvari koje se koriste za duboko vučenje i oblikovanje
2. ulja, masnoće i ostale tvari koje su se koristile za podmazivanje
3. kamenci, oksidi i prljavština

#### 4. ostaci od čišćenja kao što su ostaci abraziva i brušenja

Neke tvari se vrlo teško uklanjaju pa je potrebno više različitih metoda čišćenja, kao na primjer neka ulja za rezanje koja se teško čiste pa je potrebna kombinacija prskanja toplom emulzijom, toplih alkalnih kupki i toplih ispiranja [1]. Proces čišćenja je vrlo važan i ponekad kompliciran pa je stoga važno obraditi svaki aspekt na zadovoljavajućoj razini.

### 3.1.1 Proces kemijskog čišćenja

Metode kemijskog čišćenja površina mogu se kretati od jednostavnih ručnih uranjanja do vrlo složenih procesa s višestupanjskim automatskim procesima/postupcima. Postoje metode koje su uobičajene u industriji i koje se često koriste za uklanjanje nečistoća.

- **čišćenje otapalima:** primjenjuje se u obliku namakanja ili prskanja, koriste se naftni derivati ili klorirana otapala. Namjena im je uklanjanje ulja, masnoća i voska s površine materijala koji se lemi.
- **čišćenje emulzijom:** upotrebljava se emulzija koja kombinira otapalo i vodu uz dodatak emulgatora kako bi se učinkovito uklonila ulja, masti i pigmenti s površine. Često se koristi kao prethodni korak prije daljnjeg čišćenja.
- **čišćenje alkalnim otopinama:** koristi se vodena otopina alkalnih tvari kao što su natrijev hidroksid ili natrijev karbonat kako bi se uklonile masti, ulja ili tanji oksidni slojevi. Primjenjuju se alkalne kupke ili kao prskanje otopinama kod proizvodnje vrlo velikih komada.
- **čišćenje kiselinama:** koristi se razrijeđena otopina različitih kiselina kao što su klorovodična, sumporna i fosforna za uklanjanje oksida, korozivne naslage i priprema površine za lemljenje. Često se koriste u metalurgiji i automobilske industriji.
- **elektrolitičko čišćenje:** u ovoj metodi se kombinira kemijsko čišćenje i električna struja. Dijelovi se uranjaju u elektrolit i izlažu su električnom potencijalu. Vrlo je učinkovito kod uklanjanja masnoća, oksida i druge nečistoće, posebno ako je komad složene geometrije i ima puno teško dostupnih i/ili nedostupnih mjesta.
- **Mehaničko kemijsko čišćenje:** ovdje se kombiniraju kemijske otopine i mehaničke metode, kao što su četkanje ili mlazni sustavi. Koristi se za uklanjanje tvrdokornih naslaga koje je teško skinuti samo kemijskim putem, osigurava visoku razinu čistoće.

- **Ultrazvučno čišćenje:** ultrazvučnim valovima u kombinaciji s otapalima ili vodenim otopinama učinkovito uklanja i najsitnije čestice i nečistoće iz složenih struktura i teško dostupnih mjesta. Koristi se za čišćenje mikrokomponenti i preciznih dijelova.
- **Pranje parom:** koristi se para pod visokim tlakom s dodatkom nekih kemijskih sredstava. Najčešće za uklanjanje masnoće i ulja, ali može uklanjati i druge nečistoće.
- **Specijalizirana otapala za uklanjanje oksida:** upotrebljavaju se specifična otapala koja razgrađuju oksidne slojeve, primjerice fluorovodična kiselina ili posebne kiseline za aluminij i nehrđajući čelik. Za uklanjanje tvrdokornih oksida i pripreme površine za daljnju obradu. Koristi se kod materijala kao što su legure aluminijska i nehrđajući čelik.[1]

### 3.1.2 Proces mehaničkog čišćenja

U postupke mehaničkog čišćenja spadaju brušenje, turpijanje, strojna obrada, pjeskarenje i čišćenjem žičanom četkom. Sve se koriste za uklanjanje nečistoća na spojnim površinama, a osim toga cilj im je i napraviti površinu hrapavijom i grubljom kako bi se pravilno pripremile za tvrdo lemljenje. Važno je napomenuti ukoliko se koristi žičani kotač važno je pripaziti kako ne bi došlo do poliranja jer se u poliranu površinu mogu ugraditi oksidi što smeta kvašenju osnovnog materijala dodatnim materijalom. Isto tako važan je odabir materijala čekinja koje se moraju podudarati s materijalom koji se obrađuje.[1]

Valjanje, fino brušenje ili lepanje naprave površinu osnovnog materijala previše glatkom, pa dodatni materijal neće pokvasiti površine spoja učinkovito kako bi trebao. Tada bi trebalo površinu mehaničkim sredstvima abrazije napraviti grubljom/hrapavijom kako bi se poboljšalo kvašenje.[1] Kod brušenja površina dijelova koji se leme, potrebno je osigurati da rashladna tekućina bude čista i bez nečistoća kako bi se spriječilo utiskivanje tih istih nečistoća u spojne površine.[4]

Različite tehnike pjeskarenja se upotrebljavaju na spojnim površinama koji se tvrdo leme kako bi se uklonili oksidi s površine. Pjeskarenje isto tako ohrapavi površinu spoja kako bi se povećala kontaktna površina za tvrdo lemljenje. Materijal za pjeskarenje isto kao i rashladna tekućina kod brušenja moraju biti čisti i ne smiju ostavljati naslage na površinama koje bi mogle ometati postupak lemljenja ili zaustaviti/ograničiti protok dodatnog materijala.[1] Zrna za pjeskarenje bi trebala biti fragmentirana tj. nepravilnog oblika s oštrim rubovima. Primjeri

takvog materijala su: zrna silicij karbida, aluminij oksid i zrna od lijevanog željeza ili kaljenog čelika. Sferična zrna (glatkog oblika, nalik kuglicama) djeluju tako da više zbijaju površinu nego što je hrapave. Zbijanjem površine dolazi do plastične deformacije površinskog sloja, što može zatvoriti mikro pore i smanjiti kapilarnu privlačnost. To otežava kvašenje dodatnog materijala i može smanjiti kvalitetu spoja. Primjer takvog materijala su staklene kuglice [5]. Postupak pjeskarenja bi se trebalo izvoditi tako da se osjetljivi dijelovi ne deformiraju ili oštete. Osim oblika zrna također je važna veličina zrna i jačina intenziteta medija koji prenosi zrno jer mogu utjecati na vijek trajanja materijala zbog zamora.[1]

Korištenje ovih materijala treba se pažljivo razmotriti, posebno u odnosu na osnovne materijale koji se koriste i kakva je primjena lemljenih sklopova. Važno je biti oprezan jer se ovi materijali mogu ugraditi u osnovne materijale i otežati kvašenje površine legurama za tvrdo lemljenje. Mokro pjeskarenje je prihvatljivo koristeći gore navedene materijale, ali je potrebno osigurati pravilno čišćenje i sušenje dijelova kako bi se spriječila kontaminacija površine.[1]

### 3.1.3 Procesi toplinskih čišćenja

Korištenje toplinskih tretiranja može se iskoristiti za čišćenje površina koje bi inače bilo teško očistiti nekim drugim metodama. Dijelovi se mogu izlagati temperaturnim ciklusima koji su slični ili na višoj temperaturi od one na kojoj će se tvrdo lemiti kako bi se smanjila pojava oksida, a moguća onečišćenja maknula sagorijevanjem.

### 3.1.4 Predpremazi i završni sloj

Kod određenih primjena dijelovi koji se tvrdo leme prethodno se premazuju korištenjem metoda poput elektrodepozicije, vrućeg uranjanja, toplinskog naštrcavanja i oblaganja. To se često koristi kako bi se osiguralo kvašenje i protok na osnovnim materijalima koji sadrže metale kao što su aluminij, titan ili neki drugi dodatak koji stvara stabilne okside tijekom zagrijavanja te ih je stoga teško nakvasiti sa lemom. Premazi isto tako štite površine koje su prethodno očišćene i sprečavaju nastajanje novih oksida na osnovnim materijalima tijekom skladištenja i procesa zagrijavanja. Kod lemljenja dvaju različitih osnovnih materijala premazi mogu spriječiti da se dodatni materijal širi na jedan osnovni materijal na kojeg se preferencijalno kvasi i širi. Odabir i debljina premaza ovise o osnovnom materijalu, dodatnom materijalu/lemu i tehnici kojom se lemi. Moguće je isto tako koristiti materijale koji sprečavaju odnosno limitiraju dodatne metale

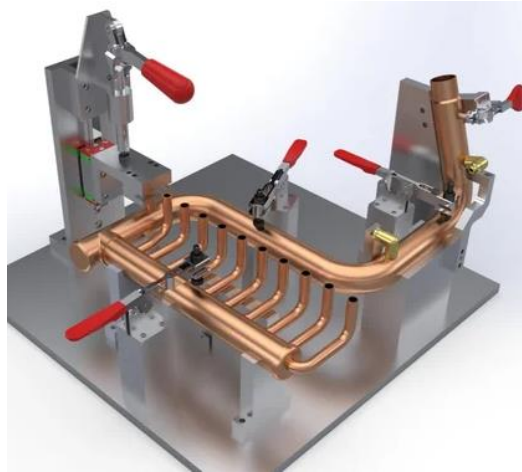
na područje koje se lemi te da spriječe kvašenje ostalih dijelova osnovnog materijala koji nisu u kontaktu, koji se ne leme. Pripravci se obično sastoje od oksida aluminijskog, magnezijevog, titana i rijetkih minerala koji su stabilni u vakuumu ili reducirajućim atmosferama. Dostupni su u obliku suspenzija ili mješavina s organskim vezivima. Materijali za zaustavljanje („*stop-off*“) nanose se četkanjem ili pomoću hipodermičkih igala na područja gdje treba spriječiti protok i kvašenje dodatnog materijala. Već male količine ovog materijala za zaustavljanje vrlo su učinkovite, dok prevelike količine zahtijevaju skupe postupke uklanjanja.

Čišćenje i održavanje čistoće izuzetno su važni u postupku lemljenja. Iako neka talila mogu tolerirati veće količine oksida, ne preporučuje se njihovo zadržavanje, jer zaštitne atmosfere to ne bi mogle učinkovito neutralizirati. Preporuča se korištenje čistih soba ili plastičnih spremnika u kojima su kontrolirane atmosfere kako bi se očuvala potrebna čistoća. [1]

## 3.2 Metode zagrijavanja

Najvažniji dio lemljenja je postizanje odgovarajuće temperature zagrijavanjem. Prije opisa metoda zagrijavanja važno je naglasiti važnost sklapanja i učvršćivanja (Slika 1) u postupku lemljenja kako bi se osiguralo pravilno pozicioniranje dijelova i kontrola postupka tijekom procesa grijanja i lemljenja. Nekoliko važnih aspekata:

- sklapanje dijelova (dijelovi se moraju precizno poravnati kako bi se ravnomjerno raspodijelio dodatni materijal),
- učvršćivanje dijelova (pribor i naprave koriste se za držanje dijelova u ispravnom položaju),
- tipovi učvršćenja (korištenje mehaničkih učvršćenja, privremenih spajanja ili samo podržavajući dizajn),
- zagrijavanje i ravnomjernost (naprave moraju omogućiti ravnomjerno zagrijavanje cijelog sklopa),
- izazovi u učvršćenju (prekomjerni pritisak, loše poravnanje, kontaminacija spoja)

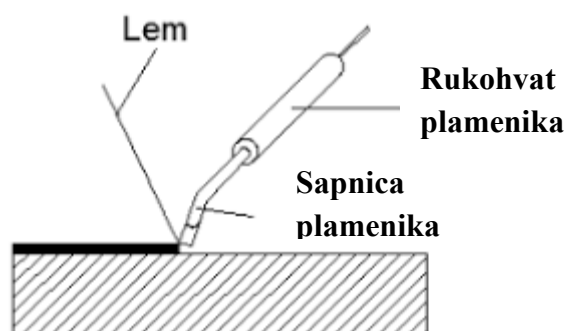


Slika 1 Naprava za stezanje [14]

Pravilno sklapanje i učvršćivanje ključno je za postizanje kvalitetnih spojeva i izbjegavanje skupih grešaka u proizvodnji.

### 3.2.1 Plinsko tvrdo lemljenje

Kod postupka lemljenja plamenom toplina potrebna za taljenje dodatnog materijala osigurava se plamenom koji nastaje izgaranjem plina (to podrazumijeva svaki postupak izgaranja plina s kisikom ili zrakom poput acetilena, vodika ili propana). U postupak spada zagrijavanje sklopa pomoću jednog ili više izvora plamena ili pomicanjem plamenika ili izradaka kako bi se postigla ujednačena temperatura pogodna za tvrdo lemljenje. Plinsko tvrdo lemljenje je postupak koji se vrlo lako automatizira, kada više nije isplativo korištenje ručnog plamenika. [1] Ručno lemljenje plinskim plamenom je metoda koja se često koristi za popravke, za poslove koji se odvijaju na terenu i za male serijske proizvodnje kao alternativa zavarivanju (Slika 2). Plinsko lemljenje je vrlo čest postupak koji se može naći u svim industrijama koji koriste tvrdo lemljenje zbog jednostavnosti i relativno brzog postupka. [2]

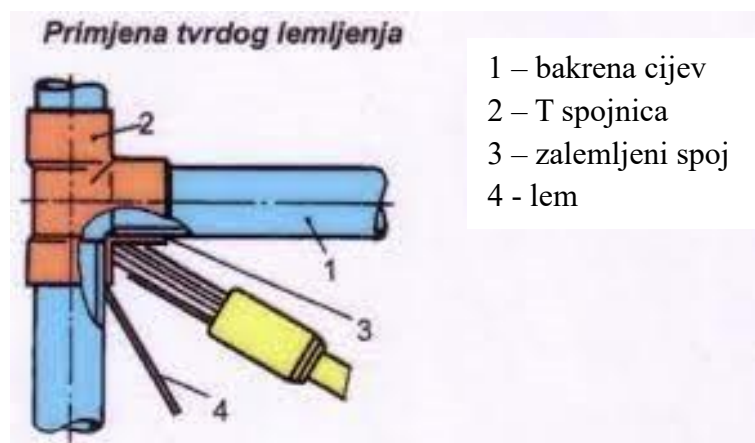


Slika 2 Ručno lemljenje plinskim plamenom [15]

Tvrdo lemljenje plinskim plamenom široko je korištena metoda koja ne zahtijeva velika ulaganja u opremu, osobitu u slučaju ručnog lemljenja, a vještine lemljenja se lako steknu. Isto tako oprema je prijenosna i može se koristiti u drugim postupcima kao zavarivanje plinskim plamenom (razlika je korištenje drugih sapnica i dizni te korištenje drugih temperatura) koje je prema potrebnoj vještini vrlo slično te radnici vrlo lako mogu naučiti jedno i drugo. [1, 7]

Tvrdo lemljenje plinskim plamenom vrši se u zraku bez potrebe za zaštitnim plinom, ali se zato obično koristi talilo. Gotovi spojevi moraju na kraju procesa proći postupak čišćenja kako bi se uklonili ostaci talila i toplinska oksidacija koji imaju vrlo korozivan učinak ako se ne maknu. [1]

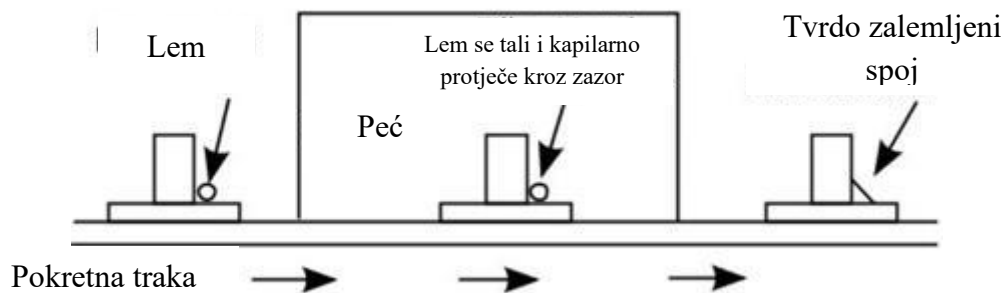
Prednosti tvrdog lemljenja plinskim plamenom su ogromne i zato se puno koristi u malim proizvodnjama kao pojedinačna i automatizirana proizvodnja (Slika 3). Osim mogućnosti automatizacije i korištenja više plamenika na jednom proizvodu, oprema je lagana i prijenosna, početna ulaganja su relativno mala, plamen se može podesiti na reducirajući, neutralan ili oksidirajući ovisno o primjeni, lem se može dodavati u tijeku procesa ili prije početka grijanja, može se koristiti velik raspon grijanja itd. Nedostaci tvrdog lemljenja plinskim plamenom, kojih nema puno ali ih se mora uzeti u obzir: korištenje talila rezultira stvaranjem poroznijih spojeva nego kod onih koji su vršeni u kontroliranoj atmosferi; lemljenje se vrši u oksidirajućoj atmosferi pa spojevi zahtijevaju neku vrstu čišćenja; korišteni metali mogu biti opasni po zdravlje. [1]



Slika 3 Tvrdo lemljenje plamenom [15]

### 3.2.2 Tvrdo lemljenje u peći

Lemljenje u peći ima prednost jer se tada koristi zaštitna atmosfera ili vakuum koje je lakše proizvesti nego korištenje čistih plinova (Slika 4). Osim toga, omogućena je kontrola i zapisivanje svake faze procesa zagrijavanja i hlađenja pomoću različitih senzora i računalnim instrumentima, što pomaže u automatizaciji i ponovljivosti procesa. [1]



Slika 4 Tvrdo lemljenje u peći [16]

Postoje dvije vrste tipskih peći koje se koriste kod postupka lemljenja: peći koje obrađuju jednu po jednu šaržu i peći kroz koje prolazi traka koja kontinuirano dovodi radne komade u peć da bi postigli najveću proizvodnost. Važna razlika između pojedinih peći je ima li kontroliranu atmosferu ili vakuum. (2)

Peći za zagrijavanje koriste mješavinu kisika i gorivog plina ili električno grijanje. Većinom se kombiniraju obje metode zagrijavanja: zračenje električnog grijača i prirodna konvekcija prilikom sagorijevanja plina te se tako vrijeme zagrijavanja smanjuje za 50 %. Bez obzira na izvor zagrijavanja, mora se osigurati ravnomjerna temperatura kako bi izbjegli deformacije koje bi se mogle dogoditi kod lokalnog zagrijavanja plamenikom. Kako bi peć ravnomjerno zagrijavala i održavala toplinu važno je da ima pravilan sustav za kontrolu temperature i upravljanje [1, 2].

Odabir talila važan je dio kod lemljenja u peći. Koristi se reducirajuća atmosfera koja ne dozvoljava stvaranje oksidnih slojeva bez upotrebe talila jer temperature na kojima se više ne stvaraju oksidi su više od temperature taljenja dodatnog materijala pa se mora koristiti talilo. [4] Važno je sažeti glavne prednosti tvrdog lemljenja u pećima: ujednačeno zagrijavanje



materijala; kontrolirana atmosfera kako bi se spriječila oksidacija; mogućnost lemljenja velikih šarži i kontinuirano lemljenje komada; precizna kontrola temperature zbog sustava senzora i računalnog vođenja; manja potreba za naknadnom obradom zbog manje oksidacije predmeta; mogućnost lemljenja kompliciranih spojeva zbog manje deformacije komada i korištenja naprava za stezanje kako bi se ostvario pravilan razmak. Nedostaci tvrdog lemljenja u pećima: povelika potrošnja energije zbog konstantnog održavanja temperature pogotovo kod kontinuiranog lemljenja; ograničenje veličine predmeta veličinom otvora peći (veće peći zahtijevaju veću početnu investiciju). [1, 2]

### 3.2.3 Indukcijsko lemljenje

U mnogim konstrukcijama metalne komponente mogu se spojiti selektivnim grijanjem do temperature lemljenja točno određenih dijelova koji se spajaju koristeći induciranu električnu struju preko zavojnice (Slika 5). Zavojnica (induktor) kroz koju prolazi izmjenična struja stvara promjenjivo elektromagnetsko polje. Kada se vodljivi materijal (metal) nalazi unutar tog polja, u njemu se induciraju vrtložne struje prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. Inducirane struje kruže unutar metala i zbog električnog otpora materijala dolazi do zagrijavanja (Jouleov efekt, tj.  $P = I^2R$ ). Dubina zagrijavanja ovisi o frekvenciji izmjenične struje, električnoj vodljivosti i magnetnim svojstvima materijala. Zagrijavanje je brzo, učinkovito i precizno, omogućujući kontrolirano toplinsko djelovanje samo na određene dijelove izratka, bez zagrijavanja okolnih područja. [1]

Indukcijsko lemljenje ima široku upotrebu u proizvodnji potrošačkih i industrijskih proizvoda, strukturnih sklopova, električnih i elektronskih sklopova, rudarske opreme, strojeva i ručnih alata.[1]

Kako bi se lemljenje ovim postupkom odvijalo kako treba raspodjela topline mora biti odgovarajuća u svi dijelovima spoja, a to ovisi o dizajnu zavojnice, brzini zagrijavanja, električnoj i toplinskoj vodljivosti materijala. Zavojnice se izrađuju od bakra i dolaze u različitim oblicima (okrugle, pravokutne, kvadratne) kako bi se prilagodile geometriji dijelova. Dizajn varira od vanjskih zavojnica solenoida za učinkovito zagrijavanje, pa sve do specijaliziranih zavojnica s koncentradorima ili transportnih zavojnica za kontinuirane procese (Slika 5). [1,2]



Slika 5 Posebno dizajnirana zavojnica za lemljenje aluminija [17]

Prednosti ove tehnologije su: selektivno grijanje točno određenih dijelova kako se ne bi zagrijavao cijeli sklop i tako smanjile deformacije i promjene u materijalu, precizna kontrola temperature kako bi se osigurala jednolika proizvodnja svih komada i spojevi ostali jednaki s glatkim prijelazima, korištenje naprava za stezanje je pojednostavljena i životni vijek je duži jer se ne zagrijavaju, velika proizvodnost i mogućnost automatizacije postupka. Nedostaci ovog postupka su: nemogućnost lemljenja kompleksnih konstrukcija zbog oblika induktora, prijanjanje između dijelova mora biti vrlo precizno bez oštrog brida kako bi se osiguralo precizno kvašenje, početni trošak opreme je veći od prvih dvaju postupka zbog toga što oprema mora biti prilagođena točno određenim primjenama i obliku konstrukcija zbog nemogućnosti prijelaza s jedne konstrukcije na drugu, nego je potreban drugačiji oblik i vrsta zavojnice. [1,2]

Postoji nekoliko izvora visokofrekventne energije koji napajaju induksijske zavojnice, svaki s različitim rasponom frekvencija. Frekvencija izvora određuje način zagrijavanja radnog komada: visoke frekvencije uzrokuju površinsko zagrijavanje, dok niže frekvencije omogućuju dublje prodiranje topline. Potrebna toplina za lemljenje obično se postiže unutar 10 do 60 sekundi.[4]

### 3.2.4 Lemljenje uranjanjem

Proces lemljenja uranjanjem podijeljen je u dvije osnovne skupine: uranjanje ili potapanje dijelova koji se leme u rastaljeni dodatni materijal ili potapanje dijelova koji se leme u rastaljenu sol. Temperatura kod oba ova postupka je niža od temperature tališta osnovnog materijala, ali

iznad temperature tališta dodatnog materijala. Ovaj postupak je ograničen u nekim primjenama, ali se i dalje koristi za lemljenje aluminijske i željezne i bakrene legure. [1]

Konstrukcija peći: kupka soli smještena je u metalnom ili keramičkom loncu koji drži rastaljenu sol. Materijal posude ovisi o vrsti soli: čelične legure ili magnezijsko-kromna vatrostalna opeka za cijanidne i soli ugljične kiseline; keramičke posude za neutralne kloridne soli i soli s dodatkom talila (npr. boraks, kriolit); posude od čelika ili legura otpornih na toplinu koriste se kada se uz lemljenje izvodi i pougljeničavanje ili cijanidizacija.

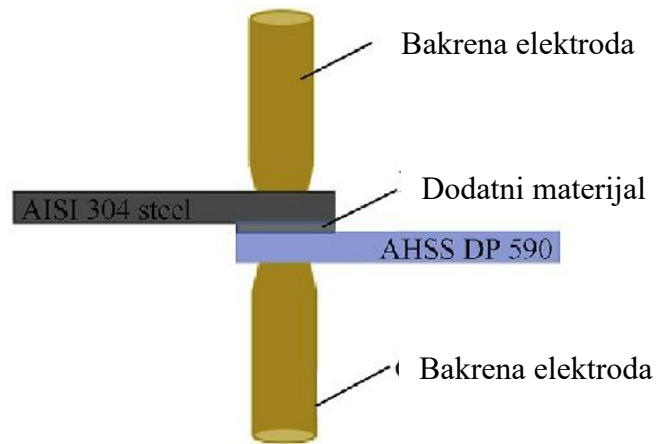
Grijanje može biti vanjsko (plin, ulje, električni elementi) ili unutarnje (grijači za uranjanje ili elektrode koji provode struju kroz sol). Vanjski grijači zagrijavaju stijenke posude koje zatim prenose toplinu na sol dok se otpadna toplina iz peći može koristiti za predgrijavanje radnih komada. Unutarnji grijači mogu biti ili uronjeni grijači ili elektrode koje stvaraju elektromagnetsko miješanje soli za ravnomjerno održavanje temperature. [1,2]

Prednosti ove tehnike lemljenja su: glatki, čvrsti i kontinuirani spojevi; veliki broj spojeva na jednom elementu može se lemiti istovremeno; može se lemiti čak i vrlo tanki aluminij; brzo i ujednačeno zagrijavanje, stopa zagrijavanja u peći s kupkom soli četiri do pet puta je brža nego u peći s atmosferom. Ograničenja postupka lemljenja uranjanjem su: zatvorene konstrukcije mogu imati zarobljeni zrak što može uzrokovati nepotpuno lemljenje, što pak može stvarati korozijske probleme; kupke soli moraju se držati na radnoj temperaturi i zahtijevaju periodično održavanje; potrebno čišćenje spojeva nakon lemljenja; svi dijelovi moraju se predgrijati kako bi se spriječilo smrzavanje soli i taloženje vlage kad su dijelovi uronjeni.[1]

### 3.2.5 Elektrootporno tvrdo lemljenje

Elektrootporno tvrdo lemljenje (eng. *Resistance Brazing*) je tehnika lemljenja u kojoj se dva dijela koja se spajaju postavljaju između elektroda ili se izravno povezuju s izvorom električne struje. Na spoju između kojih se nalazi dodatni materijal (lem), koji će se rastaliti i omogućiti formiranje čvrstog spoja (Slika 6). Kada kroz spoj prolazi električna struja, prema Jouleovom zakonu ( $P = I^2R$ ), toplina se stvara proporcionalno kvadratu struje i otporu materijala. Načelo rada ove tehnike je da se u komadu zbog kristalnih nepravilnosti (poput praznina, dislokacija, iona, granica zrna) i fonona (termalno induciranih kvantiziranih elastičnih valova u kristalnoj rešetki), ometa protok elektrona i u tom procesu se dio energije elektrona pretvara u toplinu.

Ključni faktor je prijelazni otpor na kontaktu dvaju dijelova, jer se na tom mjestu najviše oslobađa toplina. Nakon što se lemi materijal zagrije iznad temperature taljenja, on se širi pomoću kapilarnog efekta između spojenih površina. To omogućuje homogenu distribuciju lema, čime se osigurava kvalitetan spoj s visokim mehaničkim svojstvima. [2]



Slika 6 Elektrootporno lemljenje [18]

Standardni transformatori koji se koriste za zavarivanje i koji pružaju niski iznos napona i visok iznos jakosti struje su pogodni za korištenje kod elektrootpornog lemljenja. Učinkovitost transformatora je određena masom i poprečnim presjekom radnog komada te termičkim svojstvima materijala. Za prijenos električne struje na radni komad se koriste specijalne elektrode te ovisno o leguri koja se lemi prenose toplinu na komad. Stoga oblik i vrsta komada koji se obrađuje diktira sve važne aspekte elektroda: materijal, oblik i veličinu. Elektrode s visokom vodljivošću (poput: krom-bakar, molibden i volfram) koriste se za zagrijavanje materijala s niskom vodljivošću, dok se grafit koristi za zagrijavanje materijala s visokom provodljivošću (poput bakra, srebra, aluminijska i zlata) koji bi se teško zagrijavao pomoću elektroda s visokom provodljivošću. Oprema za točkasto zavarivanje se uspješno koristi za tvrdo lemljenje jer se u njoj nalazi i transformator i gornja i donja elektroda te postoji mogućnost kontrole parametara struje i napona kao i kontrola pritiska u elektrodama. [1, 2]

Prednosti otpornog lemljenja: ekonomično je jer se ne grije cijeli komad nego samo dio koji se lemi; precizno grijanje omogućuje grijanje malih područja, što je korisno kada su spojevi blizu osjetljivih dijelova na temperaturu; proces je vrlo brz, što smanjuje oksidaciju radnih komada. Nedostaci ovog postupka: materijali moraju biti električno provodljivi; grijanje velikih i debelih komada zahtijeva vrlo veliku struju da bi se zagrijalo određeno područje te dolazi do problema ujednačenog zagrijavanja i pregrijavanja po cijelom poprečnom presjeku; naprave za prihvat i

stezanje mogu biti komplicirane zbog jake struje te moraju biti pravilno izolirane ili neprovodljive. [1]

### 3.2.6 Zavarivačko lemljenje

Razlika između ovog postupka lemljenja i ostalih postupaka je da se kod ovog postupka ne koristi kapilarno djelovanje materijala da popuni prazninu između materijala koji se spajaju, već se spajanje vrši depozicijom materijala. Važno je napomenuti da iako se postupak zove zavarivanje, osnovni materijal se ne tali već samo dodatni materijal. Postupci koji se koriste su: plinsko zavarivanje kisikom i gorivim plinom (eng. *OFW*), elektrolučno zavarivanje sa inertnim plinom (eng. *GMAW*), elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom (eng. *GTAW*), elektrolučno zavarivanje plazmom (eng. *PAW*), elektrolučno zavarivačko lemljenje sa ugljičnom elektrodom (eng. *CABW*) i elektrolučno zavarivanje sa obloženom elektrodom (eng. *SMAW*). [1]

Spajanje rastaljenog dodatnog materijala i vrućeg osnovnog materijala se odvija kao i u ostalim procesima lemljenja. Zavarivačko lemljenje osmišljeno je za popravljavanje odljevaka od lijevanog željeza zbog niže temperature nego je to kod pravog zavarivanja pa je manje mogućnosti za stvaranje pukotina. [1]

Zavarivačko lemljenje ima prednost nad ostalima postupcima taljenja zbog manje temperature te manje mogućnosti za pojavu deformacija i nastajanje pukotina. Mogu se proizvesti spojevi odgovarajuće čvrstoće za mnoge primjene; oprema je jednostavna i laka za korištenje; osnovni materijali s niskom duktilnošću, poput sivog lijeva, mogu se zavarivački lemiti bez potrebe za opsežnim predgrijavanjem osnovnog materijala; omogućuje praktično spajanje različitih metala, poput bakra s čelikom ili lijevom, te legura nikla i bakra s lijevom i čelikom. Nedostaci i ograničenja ovog procesa su: čvrstoća zalemljenog spoja ograničena je čvrstoćom dodatnog materijala; radna temperatura je niža nego kod zavarenog spoja zahvaljujući prisutnosti dodatnog materijala; ovakvi spojevi su podložni galvanskoj koroziji i kemijskom utjecaju; boja dodatnog materijala može se razlikovati od osnovnog. [1]

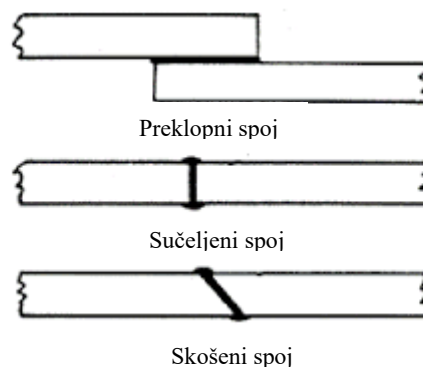
### 3.2.7 Ostali procesi

Postoje još neki dodatni procesi koje se koriste za tvrdo lemljenje ali zbog svoje specifičnosti i korištenja za točno određenu primjenu će se samo nabrojati neki od njih: lemljenje vrućim blokom, lemljenje laserom, egzotermno lemljenje, difuzijsko lemljenje, lemljenje elektronskom zrakom, infracrveno lemljenje.

Svi navedeni procesi tvrdog lemljenja prilagođeni su specifičnim zahtjevima industrije. Izbor metode ovisi o materijalima, veličini komponenata, potrebama za preciznošću i dostupnoj opremi. Tehnike poput laserskog i difuzijskog lemljenja idealne su za visoko sofisticirane spojeve, dok su egzotermalno i lemljenje vrućim blokom jednostavniji i ekonomičniji za masovnu primjenu.[1]

## 3.3 Tipovi spojeva u tvrdom lemljenju

Nekoliko čimbenika ovisi o odabiru vrste spoja kojim će se materijali spojiti, kao što su vrsta procesa za lemljenje koji se koristi, vrsti obrade koja se koristila prije lemljenja, broj komada koji se spajaju, metoda dodavanja lema i tehnički zahtjevi spoja. Čvrstoća zalemljenog spoja ovisi o razmaku između komada koji se spajaju, stupnju miješanja između dodatnog i osnovnog materijala i o količini uključaka i nepravilnosti u spoju. U pravilu postoje dvije vrste spojeva koji se koriste u tvrdom lemljenju: preklopni i sučeljeni spoj (Slika 7) [1]



Slika 7 Vrste spojeva u tvrdom lemljenju [19]

Kod preklopnog spoja područje preklopa na spoju odlučuje koliku čvrstoću će sam spoj imati, čak i kod korištenja dodatnog materijala sa slabijom čvrstoćom od osnovnog materijala preklop od 3 do 4 puta debljina najtanjeg materijala u spoju (čak i ako postoje uključci ili nepravilnosti)

će osigurati u većini slučajeva maksimalnu čvrstoću u spoju. Preklopni spojevi se koriste zbog mogućnosti proizvodnje spoja s najvećom učinkovitosti i najvećom lakoćom proizvodnje. Nedostatak ovog spoja je povećanje poprečnog presjeka na mjestu spajanja zbog potrebnog preklopa i stvaranja koncentracije naprezanja na mjestima promjene veličine poprečnog presjeka.[1, 7]

Sučeljeni spojevi se većinom koriste gdje debljina spoja mora biti određena i gdje će čvrstoća spoja zadovoljiti potrebne uvjete. Čvrstoća precizno izvedenog spoja može biti zadovoljavajuća u laboratorijskim uvjetima, no u praksi će takav spoj popustiti znatno prije osnovnog materijala zbog naprezanja koja nastaju tijekom upotrebe. Maksimalna čvrstoća se ne može postići ako je dodatni materijal puno slabiji od osnovnog materijala pa se mora koristiti materijal koji ima slične ili bolje karakteristike od osnovnog materijala te isto tako broj uključaka i nepravilnosti mora biti minimalan. [1]

Drukčija vrsta sučeljenog spoja je skošeni spoj kod kojeg je povećana kontaktna površina kako bi se poboljšala svojstva, a i dalje da će debljina poprečnog presjeka ostati ujednačena. Budući da spoj nije okomit na os naprezanja, čvrstoća skošenog spoja je približna kao kod preklopnog spoja te je jači nego sučeljeni spoj. [1]

Još jedna važna stavka kod izrade pravilnog i čvrstog spoja je udaljenost između dodirnih površina, odnosno zazor. Zazor ima veliki učinak na kvalitetu lemljenog spoja jer izravno utječe na protok lema, kapilarni učinak, čvrstoću spoja i njegovu dugotrajnost. Zazor kod elemenata od sličnih materijala lako se održava kod konstrukcija gdje su pojedini dijelovi uprešani ili zahtijevaju dobro prijanjanje. Kod elemenata različitih metala koji imaju različita toplinska svojstva mora se uračunati širenje materijala na temperaturi lemljenja. Kako bi se ostvario potreban zazor za dobro prodiranje dodatnog materijala može se koristiti žice za razmak, podloške, pjeskarenje itd. Kod sličnih materijala približno jednake mase, zazor na sobnoj temperaturi (prije lemljenja) obično je dobar pokazatelj. Kod lemljenja različitih materijala, materijal s većim koeficijentom toplinskog širenja može povećati ili smanjiti zazor, ovisno o relativnom položaju i konfiguraciji materijala. [1]

### 3.4 Uloga i primjena talila

Lemljenje je ključni proces u strojarstvu koji omogućuje učinkovito spajanje materijala. Uspjeh ovog procesa ovisi o pravilnoj upotrebi talila. Talilo djeluje kao zaštitno sredstvo koje osigurava čvrste i čiste spojeve omogućujući kvalitetno izvođenje lemljenja. Ovo poglavlje obrađuje vrste talila, primjene, zahtjeve za različite materijale, metode primjene, proces čišćenja nakon lemljenja i razloge zbog kojih je čišćenje nužno.

Svrha talila u lemljenju je osigurati čvrst i kvalitetan spoj tako što štiti osnovni materijal i dodatni materijal od oksidacije tijekom procesa. Osim zaštite, talilo također ima ulogu uklanjanja oksida s površine metala, čime smanjuje površinsku napetost i omogućuje ravnomjerniji kapilarni učinak dodatnog materijala. Važno je napomenuti da ni talila ni zaštitne atmosfere nisu zamišljeni da se koriste u svrhu čišćenja površine i uklanjanja nečistoća kao što su masnoće, ulja, boje i ostalih stranih materijala. Svi komadi i kontaktne površine prije lemljenja moraju se podvrgnuti procesu čišćenja kao što je to opisano u poglavlju 3.1. U nekim slučajevima, inertni plinovi ili vakuum mogu se koristiti kao zamjena za talilo jer stvaraju zaštitnu atmosferu koja sprječava oksidaciju. Kada su metali izloženi zraku, dolazi do kemijskih reakcija, a njihov intenzitet raste s porastom temperature. Najčešći rezultat tih reakcija je stvaranje oksida, iako u nekim slučajevima mogu nastati i nitriti ili karbidi. Brzina i karakteristike oksidacije ovise o vrsti metala i svojstvima samog oksida, uključujući njegovu debljinu, strukturu, čvrstoću i otpornost na uklanjanje. U većini slučajeva, ti oksidi i drugi spojevi predstavljaju prepreku za postizanje kvalitetnih zalemljenih spojeva, jer otežavaju povezivanje lema s osnovnim materijalom.[1,2]

Talilo se koristi kako bi se spojio s neželjenim nečistoćama i oksidima na površini koja se lemi i uklonio ih ili otopio kako ne bi smetali kapilarnom protoku dodatnog materijala prilikom lemljenja. Oksidi su jedna od glavnih izvora onečišćenja, pa je njihovo otapanje i uklanjanje prilikom lemljenja jedna od najčešćih funkcija talila. Kako talilo ne bi ometalo protok metala, mora imati odgovarajuću viskoznost i biti lako zamijenjeno rastaljenim dodatnim materijalom prilikom kapilarnog djelovanja. Stoga su sposobnost kvašenja i viskoznost talila na temperaturi na kojoj se lemi važna svojstva. [1]

Razni kemijski spojevi igraju ključnu ulogu u određivanju kemijskih svojstava talila, omogućujući mu učinkovito uklanjanje oksida, poboljšanje kvašenja površine i olakšavanje protoka rastaljenog metala. Talila se većinom oblikuju za određene svrhe i određene postupke



jer na određenim temperaturama mogu nastati novi kemijski spojevi, različiti od početnih kemijskih sastojaka. Kemijska promjena je vrlo naglašena prilikom lemljenja zbog reakcije talila s kisikom, osnovnim materijalom, dodatnim materijalom i bilo kojim drugim materijalom koji je prisutan u procesu lemljenja zbog visoke temperature. Talilo se mora prilagoditi određenoj primjeni odnosno njegove komponente moraju biti odabrane tako da zadovolje sve uvjete lemljenja.[2]

Talila su definirana normom: HRN EN ISO 18496:2021. Ova norma određuje podjelu talila koja se koristi za tvrdo lemljenje materijala i obilježava talila na osnovu njihovih svojstava i primjene, isto tako navodi zdravstvena upozorenja i stanje u kojem se određena talila isporučuju. Norma definira podjelu u dva tipa: FH i FL talila i dijele se prema temperaturnim svojstvima specifičnoj primjeni. FH talila (*eng. flux high-temperature*) se koriste za lemljenje pri visokim temperaturama iznad 450°C te su posebno dizajnirana da na tim temperaturama ne gubi svoja svojstva. Aktivni su i sposobni ukloniti tvrdokorne okside, koriste se u postupcima lemljenja čelika, nehrđajućeg čelika i legura sa molibdenom, kromom, niklom i plemenitim metalima; to su najčešće talila na bazi borata i fluorida. FL talila (*eng. flux low-temperatures*) se koriste na nižim temperaturama, većinom za meko lemljenje ili upotrebu na materijalima koji su osjetljivi na visoke temperature (idealni za lemljenje aluminija, bakra i legura s nižim talištima). [9, 1]

### 3.4.1 Talila za primjenu kod viših temperaturnih raspona - FH talila

Prema normi HRN EN ISO 18496:2021 FH talila su podijeljena na devet grupa po posebnim temperaturnim zahtjevima i primjenama [4,9]:

- FH 10

Temperaturni raspon ove grupe talila je od 550°C – 800°C pa se koriste za tvrdo lemljenje iznad 600°C za opće namjene. Sastav čine spojevi bora, jednostavni i kompleksni fluoridi. Ostatak koji ostaje na mjestu gdje se lemi je korozivan, uklanja se pranjem i kiselinom. [9]

- FH 11

Ova grupa talila se koristi na temperaturama između 500°C – 800°C. Kemijski sastav talila iz ove grupe su spojevi fluorida, klorida i bora i koriste se za tvrdo lemljenje legura

bakra i aluminijska iznad 600°C. Ostatak im je isto korozivan te se uklanja pranjem ili kiselinom. [9]

- FH 12

Temperaturni raspon je između 550°C – 850°C i sastav ovih talila su spojevi bora, elementarni bor i fluoridi. Primjena im je tvrdo lemljenje nehrđajućih i legiranih čelika te tvrdih metala. Kemijski spojevi koji ostaju nakon lemljenja je korozivan i uklanja se pranjem i kiselinom. [9]

- FH 20

Ova talila se primjenjuju za opće tvrdo lemljenje na temperaturama između 770°C i 1000°C. Spojevi bora i fluorida se koriste za tvrdo lemljenje kod ove grupe. Ostatak je korozivan i uklanja se pranjem ili kiselinom. [9]

- FH 21

Kemijski sastav ove grupe su spojevi bora i koriste se za tvrdo lemljenje na temperaturama između 750°C . 1100°C. Ostatak nije korozivan, ali se svejedno uklanja zbog estetskih razloga. Uklanja se mehanički ili kiselinom. [9]

- FH 22

Talila koja se koriste na temperaturnim rasponima od 700 °C do otprilike 1050 °C. Sadrže spojeve s borom kao i elementarni bor. Ova talila se uglavnom upotrebljavaju za lemljenje nehrđajućeg čelika i drugih legiranih čelika te tvrdih metala. Ostaci su obično korozivni i potrebno ih je ukloniti pranjem i kiselinom. [9]

- FH 23

Talila sa efektivnim temperaturnim rasponom od 700 °C do 1200 °C. Sadrže borate i služe kao opće-namjenska talila. Ostaci su spojevi s borom. [9]

- FH 30

Ova talila se koriste kad se za lemljenje koriste dodatni materijali na bazi bakra i nikla. Sastav ovih talila su spojevi bora, fosfati i silikati. Koriste se kad su temperature više od 1000°C. Ostatak nije korozivan, uklanja se mehanički ili kiselinom. [9]

- FH 40

Temperaturni raspon ove grupe talila je između 600°C i 1000°C. Kemijski sastav su im kloridi i fluoridi bez bora. Koriste se za specifične primjene gdje bor nije dozvoljen kao npr. u elektroničkoj industriji jer bor može uzrokovati koroziju u osjetljivim komponentama. Ostatak nakon lemljenja je korozivan i mora se ukloniti pranjem ili kiselinom. [9]

### 3.4.2 Talila za primjenu kod nižih temperaturnih raspona - FL talila

Prema normi HRN EN ISO 18496:2021 – FL grupa talila sadrži tri podvrste talila koji se označavaju slovima FL i pripadajućim brojem. Njihov efektivni raspon počinje od 550°C.

- FL 10  
Ova talila sadrže higroskopne kloride i fluoride, prvenstveno spojeve litija. Ostaci nakon lemljenja su korozivni i potrebno ih je ukloniti pranjem ili kiselinom. [9]
- FL 20  
Ova talila sadrže nehigroskopne fluoride. Ostaci poslije lemljenja su načelno nekorozivni i nije ih potrebno uklanjati s radnog komada osim ako se to posebno ne zahtijeva. [9]
- FL 30  
Ova talila sadrže nehigroskopne fluoride i cezijeve fluoroaluminate. Ostaci općenito nisu korozivni i mogu ostati na radnom komadu. Pogodna su za aluminijske legure s udjelom magnezija do 0,5 % mase. [9]

### 3.4.3 Vrsta talila

**Borati:** koriste se za izradu talila za više temperature taljenja. Pogodni su za korištenje za apsorpciju oksida i pružaju zaštitu od oksidacije na duže razdoblje. Tale se na temperaturama od oko 760°C i imaju relativno visoku viskoznost pa se često miješaju s drugim solima kako bi se ta viskoznost smanjila. [1, 4]

**Elementarni bor:** u obliku finog praha, koristi se u talilima za tvrdo lemljenje kako bi se produljilo njihovo djelovanje i povećala radna temperatura. S obzirom na visoko talište bora od 2076 °C, njegov dodatak omogućuje talilu da izdrži više temperature bez razgradnje, čime se poboljšava učinkovitost procesa lemljenja. [1, 4]

**Flouorborati:** koriste se s drugim boratima ili alkalnim spojevima poput kalij karbonata. Ne pružaju zaštitu od oksidacije u istoj mjeri kao ostali borati, ali imaju bolji kapilarni efekt u rastaljenom stanju i imaju veću sposobnost otapanja oksida. [1, 4]

**Fluoridi:** (npr. kalij flourid) pri visokim temperaturama reagiraju s većinom metalnih oksida i zato su vrlo često sastavni dio talila za tvrdo lemljenje. Vrlo su važni u primjeni gdje se susreću

vatrostalni oksidi npr. oksidi kroma i aluminijska. Često se dodaju kako bi se povećali protočnost rastaljenih borata i poboljšalo kapilarno tečenje dodatnog materijala. [1, 4]

**Kloridi:** (kalij klorid, KCl) slično djeluju kao i fluoridi, ali imaju niži temperaturni raspon, pa se moraju pažljivo koristiti kako na temperaturama višim od dozvoljene ne bi oksidirali radni komad. Mogu se koristiti za snižavanje temperature taljenja talila na bazi fluorida. [1, 4]

**Borna kiselina:** ( $\text{HBO}_3$ ) glavni je sastojak koji se koristi u talilima za tvrdo lemljenje. Borna kiselina poprilično lako uklanja staklaste ostatke talila nakon lemljenja. Točka taljenja joj je niža od borata, ali viša od fluorida. [1, 4]

**Alkalije:** kalij hidroksid (KOH) i natrij hidroksid (NaOH) se ne koriste često zbog svojih higroskopskih svojstva. Čak i male količine koje se stavljaju u talilo mogu stvoriti poteškoće u vlažnim vremenskim uvjetima i ozbiljno ograničiti vijek trajanja talila tijekom skladištenja. Mogu biti korisni kod alatnih čelika koji u svom kemijskom sastavu sadrže molibden. [1, 4]

**Sredstva za kvašenje:** koriste se u obliku pasti, prašaka i tekućih talila kako bi poboljšali protok i omogućili ravnomjerno širenje talila po radnom komadu prije početka lemljenja. Njihova primjena osigurava bolje kvašenje površine i smanjuje mogućnost stvaranja praznina u spoju. Međutim, važno je pažljivo odabrati ta sredstva kako ne bi negativno utjecala na kemijsku stabilnost i učinkovitost talila tijekom procesa lemljenja. [1, 4]

**Voda:** koristi se kako bi se kemikalije korištene u talilima hidratizirale ili kao poseban sastojak. Voda koja se koristi mora biti provjerena od nečistoća. [1, 4]

#### 3.4.4 Oblici, metode upotrebe i uklanjanje talila

Talila koja se koriste za lemljenje su u obliku praha, paste, suspenzije ili tekućine. Sam oblik talila koji će se nanositi na radni komad ovisi o zahtjevima rada, postupku lemljenja i odabranoj metodi. Prašak se upotrebljava za miješanje s vodom kako bi se dobila pasta kako bi se lakše nanijela na radni komad, prašak se može koristiti kao prašak za posipavanje, ali u tom slučaju prijanjanje na komad nije dobro ako je spoj hladan. Praškasto talilo se koristi za pripremljanje kupki u postupku lemljenja uranjanjem. Pasta je oblik talila koji se najčešće koristi jer ju je lako nanijeti na osnovni komad običnim kistom ili uranjanjem komada u pastu čime se osigurava dobro kvašenje osnovnih i dodatnih materijala. [1]

Ostatak talila koji se nalazi na zalemljenom spoju i oko njega se u pravilu uklanja kako bi se zaustavila korozija dijelova kod djelovanja nekih drugih kemikalija ili same atmosfere. Ukoliko predmet nije bio dobro očišćen od svih oksida, talilo može reagirati s njima i stvoriti netopljive ostatke ili staklaste naslage koje se teško uklanja. Talilo sa zalemljenih spojeva se može ukloniti umakanjem i četkanjem u vrućoj vodi. Ovaj postupak bi trebalo sprovesti odmah nakon lemljenja te nakon toga obradak temeljito osušiti. Uranjanje u vodu odmah nakon lemljenja kad su spojevi još uvijek na visokoj temperaturi može dovesti do puknuća talila i brže uklanjanje talila. Ovaj postupak može se koristiti samo ako ne postoji mogućnost stvaranja toplinskih naprezanja u obradku. Ako je i nakon ova dva postupka i dalje ostalo talilo na površini zalemljenih spojeva preporučeni načini za uklanjanje je mehaničkim putem upotrebom različitih četki ili pjeskarenja, ali korištenjem ovog načina čišćenja treba pripaziti kako ne bi došlo do oštećivanja mekanijeg materijala. [1, 4]

## 4 Analiza norme HRN EN 13134:2001

Norma HRN EN 13134:2001 bavi se i objedinjuje zahtjeve za odobravanje postupka lemljenja. Ovaj standard služi kao uputa za osiguranje kvalitete tvrdo zalemljenih spojeva i dosljednosti u različitim procesima lemljenja u raznim industrijama. Standard pruža smjernice za ocjenjivanje postupaka lemljenja s naglaskom na kriterije poput izvedbe spoja, metalurške kompatibilnosti i kontrole procesa. Cilj ove norme je uspostaviti standardiziranu metodologiju za ocjenjivanje i odobravanje postupka lemljenja, te osigurati da svi procesi lemljenja ispunjavaju tražene zahtjeve u eksploataciji, sigurnosti i metalurške kompatibilnosti. Dokument opisuje ispitivanja i kriterije koji se primjenjuju na lemljene spojeve.

Metode ispitivanja uključuju vizualni pregled, metaluršku analizu i analizu mehaničkih svojstava. Kriteriji osiguravaju da lemljeni spoj zadovoljava očekivane standarde kvalitete u predviđenim radnim uvjetima. Ovaj dokument daje reference i na druge norme kako bi ih objedinio i kako bi korisnik znao gdje potražiti potrebne informacije/norme. Reference su na normu HRN EN 12797:2000 koja opisuje razorne metode ispitivanja i ispitne uzorke i normu HRN EN 12799:2000 koja opisuje Nerazorna ispitivanja i uzorke koji su potrebni da bi se izvela ispitivanja na uzorcima za lemljenje kako bi se osiguralo optimalno stanje zalemljenih konstrukcija. Druga norma na koju norma HRN EN 13134:2001 daje referencu je HRN EN 13133:2001 koja se bavi atestiranjem radnika koji će vršiti posao tvrdog lemljenja - lemilaca.[10]

### 4.1 Nerazorna ispitivanja tvrdo lemljenog spoja

Standard HRN EN 12799:2000 opisuje nerazorne metode ispitivanja i ispitne uzorke kako bi se isti proveo na tvrdo lemljenim spojevima. Nerazorne metode ispitivanja (NDT) se primjenjuju u praksi na radnim komadima na kojima ne smije doći do oštećenja površine ili oštećenje samog izradaka do kojih može doći prilikom korištenja razornih metoda. Dodatna prednost ovih metoda je da se ispitivanje može odrađivati na samom radnom komadu bez potrebe za izradom ispitnih uzorka upravo zbog činjenice da su metode nerazorne. Nedostatak ovih metoda je da ne daju kvalitativni podatak o mehaničkim svojstvima kao što su tvrdoća, čvrstoća, žilavost i drugi. Iako ne daju mjerljivi podatak u većini slučajeva zaključci koji se

moгу dobiti na temelju provedenih ispitivanja su dovoljni za procjenu kvalitete izvršenog tvrdo lemljenog proizvoda. Zbog načina izrade, većina zalemljenih spojeva nalazi se u preklopljenoj konfiguraciji, pri čemu se materijali spajaju pod utjecajem kapilarnog efekta. Taj efekt omogućuje ravnomjerno raspoređivanje lema unutar spoja, ali istovremeno uzrokuje da se većina grešaka i nepravilnosti koncentriraju upravo u području spoja.[13]

Podjela nerazornih ispitivanja prema normi HRN EN 12799:2000:

- Vizualna kontrola
- Ultrazvučna metoda
- Radiografska metoda
- Metoda ispitivanja penetrantima
- Metoda ispitivanja propusnosti
- Metoda ispitivanja opterećenjem
- Termografska metoda

#### 4.1.1 Vizualna kontrola

Najjednostavnija i najčešće korištena metoda nerazornog ispitivanja zbog jednostavnosti i brzine izvođenja. Prije samog pregleda valja ustanoviti koji spojevi zahtijevaju pregled i jesu li dostupni za pregled ili je potrebno pomagalo kao što su zrcalo, kamera, svjetiljka, povećalo ili mikroskop, mjerilo za uspoređivanje veličina greški. Na zalemljenom spoju se pregledava i utvrđuje izgled, kvaliteta izrade, nepravilnosti i oblik spoja. Osoblje koje ovom metodom pregledava spojeve mora biti detaljno informirano kojom metodom se spoj lemio. Svaka osoba mora biti atestirana prema normi HRN EN ISO 9712:2022, morala bi dobiti sve potrebne instrukcije i zahtjeve prije pregleda kao što su: u kojem koraku proizvodnje će se inspekcija odvijati; kakvi zahtjevi površine moraju biti; veličina i oblik grešaka; osnovne informacije o metalu i detaljan plan izrade.[13]

##### 4.1.1.1 Postupak ispitivanja

Tvrdo lemljeni spoj na kojemu se vrši ispitivanje mora se ispitati uz pomoć odgovarajućih sredstva kao što su stolna povećala (kako bi ruke bile slobodne za manipulaciju ispitnog komada) te odgovarajućih izvora svjetlosti (kako bi vidjeli sve površine koje se pregledavaju).

Prije nego se vizualni pregled započne potrebno je definirati vrstu tehnike kojom će se predmet pregledavati. Ukoliko je spoj lako vidljiv sa svih strana i može ga se pregledati bez pomoćnih sredstva onda je to direktna metoda i eventualno se kod nje može koristiti povećalom. Druga metoda je indirektna i kod nje se koriste pomoćna sredstva (kako bi se vidio spoj koji drugačije nije vidljiv) kao što su zrcalo, endoskop ili videoskop te se pomoću njih spoj pregledava. Radno mjesto na kojemu se vrši vizualni pregled, bilo to stol u uredu ili direktno u proizvodnji mora se osigurati da je dovoljno osvijetljeno kako bi se s lakoćom vidjele pogreške i nepravilnosti na spoju i kako bi se smanjilo naprezanje radnika koji izvodi ispitivanje. [13]

#### 4.1.1.2 Vrste grešaka i nepravilnosti

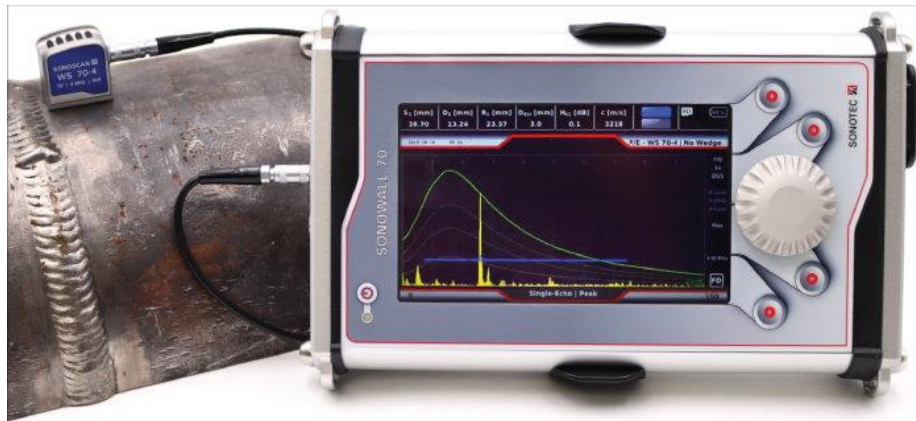
Vizualan pregled tvrdo lemljenih spojeva moguće je vidjeti naredne greške i nepravilnosti:

- Višak talila koje je ostalo na površini nakon provedenog postupka te je potrebno navesti opseg uklanjanja nakon provedenog postupka lemljenja kako bi se omogućio pregled spoja
- Uslijed pripreme zalemljenog spoja mogu nastati usahline odnosno, može se javiti zračnost na spoju ako je premalo dodatnog materijala stavljeno u postupku
- Kontinuiranost spoja - prije pregleda važno je istaknuti je li spoj kontinuiran ili diskontinuirani. Mora se navesti je li spoj prihvatljiv i do koje mjere, te je važno navesti uvjete pri kojima isprekidani spoj zadovoljava
- Previše upotrijebljenog dodatnog materijala/lema. Kako bi se spriječilo da dodatni materijal dospije na površinu oko zalemljenog spoja, potrebno je jasno označiti to područje na sklopnom crtežu. Ova oznaka služi kao smjernica za upotrebu tvari koje ograničavaju širenje rastaljenog materijala na neželjena mjesta tijekom pripreme za lemljenje, kao i za provođenje naknadnih ispitivanja.
- Kod nekih procesa lemljenja moguća je erozija površine kao primjerice kod lemljenja aluminijska. Ako je ona dozvoljena potrebno je navesti stupanj kod koje je ona prihvatljiva.
- Potrebno je uzeti u obzir pore i pukotine koje su vidljive na površini, a veće su od minimalne dimenzije nepravilnosti (obično 0,5 mm za vizualnu metodu ispitivanja). Nepravilnosti manje od te dimenzije se zanemaruju, osim ako integritet spoja zahtijeva dodatnu provjeru, u kojem slučaju se primjenjuju druge metode ispitivanja.



## 4.1.2 Ultrazvučna metoda

Metoda ispitivanja ultrazvučnim valovima ili samo ultrazvučna metoda kojoj su oprema i tehnika prijenosa valova opisane normom HRN EN ISO 16823:2014, a osnovni zahtjevi koje je potrebno zadovoljiti nalaze u normi HRN EN ISO 16810:2014. Princip ove metode je da se ispitivanje odvija korištenjem direktne metode kojom val okomito ulazi u materijal te prolazi kroz materijal iste gustoće, odnosno vrlo slab povratni signal dolazi do sonde, a kad naiđe na neku nepravilnost i grešku u spoju vrlo jak signal se vraća na sondu te znamo njegovo mjesto i dubinu (Slika 8). Ukoliko spoj ne dozvoljava upotrebu normalne sonde koja u isto vrijeme odašilja i prima valove potrebno je koristiti dvokutnu sondu koja radi kao odvojen odašiljač i odvojen prijemnik ultrazvučnog vala. [13]



Slika 8 Oprema kod ultrazvučne metode [21]

### 4.1.2.1 Postupak ispitivanja

Za provedbu ovog postupka ispitivanja potreban je izvor ultrazvučnih valova i najčešći izvor je piezoelektrična sonda koja se spaja na instrument i odašilje ultrazvučne valove gustoće koja se podese na instrumentu ovisno o materijalu. Ultrazvučni val prolazi kroz materijal te kad naiđe na grešku u spoju odbija se od njezine stražnje površine i vraća se u sondu. Tamo se energija koja se vratila pretvara u električnu veličinu kako bi ju instrument mogao dalje obraditi i prikazati na odgovarajućem uređaju kako bi se ti podaci mogli analizirati od strane osobe koja vrši ispitivanje. Upravo ta energija vala koja se vraća je najvažniji segment ove metode, u slučaju kada je spoj napravljen zadovoljavajuće, vrlo malo energije se odbija od linije spoja. Ukoliko spoj nije napravljen zadovoljavajuće, velik dio signala se odbija natrag do sonde što se vidi kod smanjenja refleksije od stražnje površine spoja.

Kako bi sonda ostvarila najbolji spoj s ispitnom površinom mora biti uronjena u tekućinu ili se mora koristiti pasta ili neki medij koji odlično provodi ultrazvučne valove jer bi se valovi inače odbijali od površine spoja i ne bi penetrirali u spoj i tako bi ugrozili provedbu ove metode. Sonda također mora biti oblikovana da najbolje prati konturu ispitne površine, odnosno kako bi najbolje nalijegala na površinu koja se ispituje. Osim toga izbor sonde ovisi o debljini i svojstvima materijala i o minimalnoj veličini nepravilnosti koja se želi detektirati, sve to je definirano u normi HRN EN ISO 16810:2014. Još jedna bitna stvar kod ostvarivanja pravilnog kontakta između površine spoja i sonde je stanje površine, pa hrapavost ne smije prijeći 6,3  $\mu\text{m}$ . Prije ispitivanja potrebno je poduzeti određene metode strojne obrade kako bi se to zadovoljilo.

Kako bi sonda pravilno očitavala potrebno ju je umjeriti i podesiti njezinu osjetljivost na određenim etalonima koji sadrži određene greške dogovorene veličine i položaja koji su proizvedene strojnom obradom, definirano normom HRN EN ISO 16811:2014. Operater mora biti atestirani i imati dovoljno vještine da prepozna i snimi greške i nepravilnosti.[13]

#### 4.1.2.2 Vrste grešaka

Greške i nepravilnosti koje se mogu otkriti ultrazvučnom metodom su:

- pore i uključci
- pukotine, većinom uzdužne, jer okomite pukotine su prikazane kao točka
- sitne pore
- nedovoljno nakvašena površina
- poprečne pukotine

Otkrivanje ovih grešaka ovisi o umjerenosti opreme i sposobnosti radnika koji vrši ispitivanja te njegovo poznavanje tehnike kojom je lemljeno i parametara koji se ispituju. [13]

#### 4.1.3 Radiografska metoda

Nerazorna metoda ispitivanja koja koristi radijaciju kao sredstvo za prodiranje u materijal i služi za detektiranje nepravilnosti u tvrdo lemljenom spoju kako bi se identificirale greške koje su kritične za eksploataciju proizvoda. Ova metoda radi na principu intenziteta prolaska zraka kroz materijal pa tako zrake drugačije putuju kroz homogeni materijal a drugačije kroz uključke

ili poroznosti što se na kraju očitava na odabranom mediju. Oprema i detaljan postupak izvođenja ove metode definirano je normom HRN EN ISO 5579:2014 [13]

#### 4.1.3.1 Postupak izvođenja

Kod postupka provedbe radiografske metode s filmom zrake poslane s izvora utječu na emulziju koja se nalazi u filmu (nešto kao kod fotografiranja sa filmom, drukčije osvijetljeni dijelovi filma imaju drugačiju nijansu te se tako formira slika), pa se tako dijelovi kroz koje lako prolaze zračenje pokazuje tamnije, a dijelovi s većom gustoćom koji lakše upijaju zračenje pojavljuju kao svjetliji dijelovi. Kod ove tehnike bitno utječe koeficijent apsorpcije zračenja dodatnog materijala, ako je sličan osnovnom materijalu primjena ove metoda za otkrivanje malih kapilarnih spojeva je otežana. Razvijene su dodatne tehnike radiografskog snimanja bez filma koje ne zahtijevaju film sa emulzijom kako bi se razvila slika, no njihova primjena je otežana zbog izazova u postizanju dosljedne osjetljivosti i ponovljivosti rezultata. Ova metoda se koristi kada dodatni materijal ima različitu apsorpciju topline ili elektromagnetskog zračenja u odnosu na osnovni materijal, što može utjecati na ujednačenost zagrijavanja i kvalitetu spoja.[4, 13]

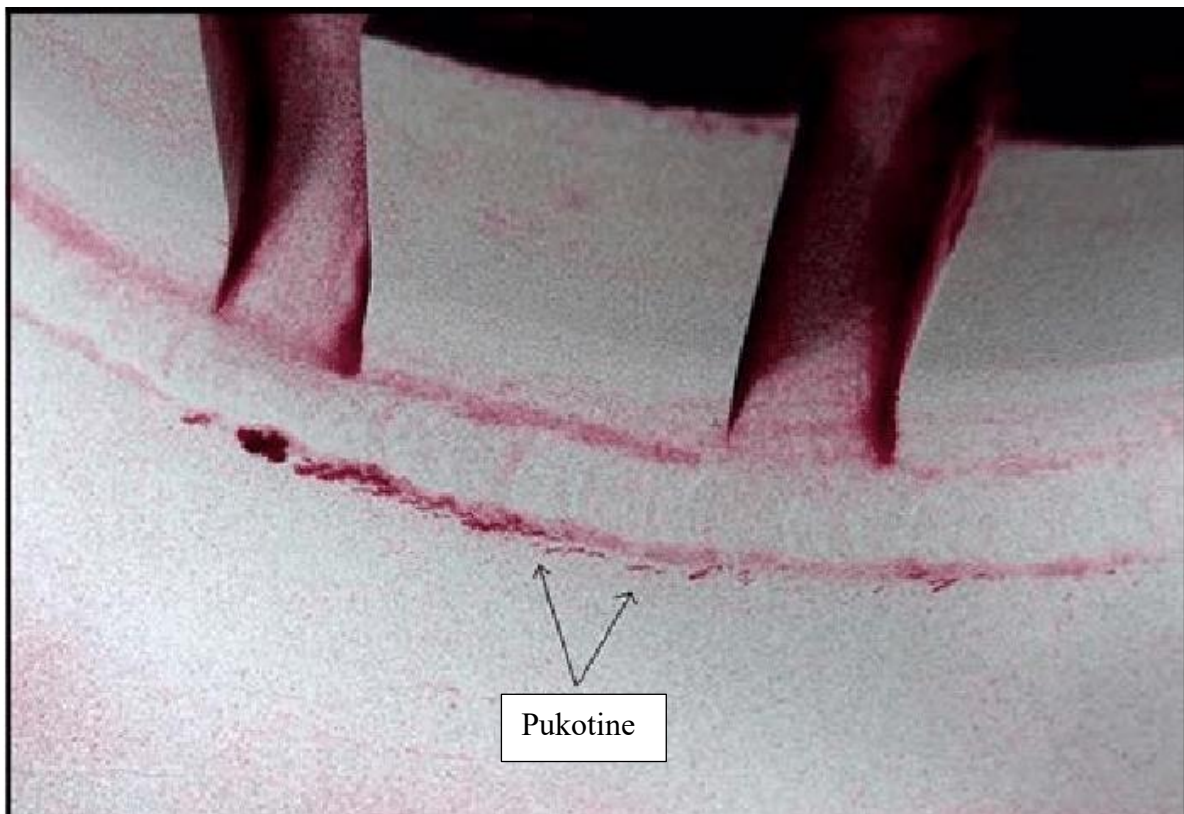
Greške koje se mogu otkriti radiografskom metoda su iste koje se mogu otkriti i ultrazvučnom metodom, jedina razlika je da se ovom metodom ne može vidjeti na kojoj dubini se nalazi greška ili nepravilnost, moguće je vidjeti samo udaljenost od rubova materijala.

#### 4.1.4 Metoda ispitivanja penetrantima

Otkrivanje površinskih nepravilnosti i grešaka kao što su pore, pukotine ili nedovoljna popunjenost dodatnim materijalom mogu se otkriti pomoću penetrantske metode. Ovom metodom moguće je vidjeti sitnije greške nego je to moguće samo vizualnom metodom, pa se ova metoda često koristi zajedno s vizualnom metodom pregleda kako bi se pregled upotpunio i kako bi pouzdanost spoja bila što veća. Norma HRN EN ISO 3452-1:2021 opisuje sve procese i tehnike za ovu metodu ispitivanja tvrdo lemljenih spojeva. Potrebno je napomenuti da je možda nemoguće potpuno ukloniti penetrante pogotovo ako postoji neka poroznost, pa je potrebno to uzeti u obzir kod odabira ove metode.

#### 4.1.4.1 Postupak izvedbe metode

Površina mora biti čista i suha prije početka ove metode, za to se trebaju koristiti propisana sredstva kako penetrant koji će se kasnije nanijeti ne bi reagirao. Osim toga potrebno je uzeti u obzir prethodnu strojnu obradu kako čestice nastale ne bi popunile neku poru i tako sakrile, odnosno onemogućile prodor penetranta i otkrivanja greške. Također je potrebno ukloniti ostatak talila i ostalih sredstva koja bi se mogla nalaziti na površini. Potom kada je površina pripremljena po zahtjevima koje diktira norma, na površinu se nanese penetrant koji mora definirani period vremena ostati na površini. Nakon isteka zadanog vremena penetrant se čisti s površine suhom krpom koja neće ostavljati tragove. Penetrant koji je ostao u porama i šupljinama i ostalim nepravilnostima će uz pomoć razvijaa pokazati indikaciju te nepravilnosti. Razvijaa kad se nanese isto mora ostati određen vremenski period. Sredstva za ovu metodu, odnosno penetrant, razvijaa i sredstvo za uklanjanje pentranta se kupuju zajedno i nije preporučljivo miješanje različitih proizvođača i isto tako treba paziti na rok upotrebe. Metoda je jednostavna ekonomična i otkriva vrlo sitne površinske nepravilnosti koje su teško vidljive golim okom (Slika 9).[4,13]



Slika 9 Prikaz pukotina sa penetrantskim sredstvima [20]

Greške koje je moguće otkriti ovom metodom [13]:

- pukotine na površini
- pore nastale nepravilnim taljenjem ili tijekom otplinjavanja kod zagrijavanja
- nedostatak spajanja između osnovnog i dodatnog materijala
- šupljine uz rubove zbog nepravilnog nanošenja talila ili nedovoljnog protoka dodatnog materijala.

#### 4.1.5 Metoda ispitivanja propusnosti

Metoda ispitivanja propusnosti se koristi kako bi se ispitala propusnost nekog predmeta ili da bi se pronašao specifični spoj koji propušta. Jedinica kojom se kvantificira ili mjeri brzina propusnosti iskazana je u jedinici paskal kubni metar po sekundi [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ]. ova metoda ispitivanja definirana je normom HRN EN 1778:2008.[13]

Postoje dva principa testiranja kod ove metode [13]:

- detektiranje propuštanja iz komada u okolinu kroz lemljeni spoj (tlačno ispitivanje)
- detektiranje propuštanja iz okoline u objekt kroz lemljeni spoj (vakumsko ispitivanje).

Korištenjem helija kao ispitnog medija u kombinaciji s masenim spektrometrom za detekciju, moguće je otkriti istjecanja minimalne veličine od  $10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ . S druge strane, pri ispitivanju mjehurićima, spoj se stavlja pod tlak i uranja u fluid ili prekriva sredstvom poput sapunice, pri čemu je najmanja detektabilna razina istjecanja  $10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ .[4]

Ova metoda može biti opasna za operatera zbog toga jer se ispitivanja vrše pod tlakovima i ponekad se koriste zapaljivi plinovi (amonijak) pa treba paziti okolinu u kojoj se vrše mjerenja i koristiti pravilnu zaštitnu opremu.

#### 4.1.6 Metoda ispitivanja opterećenjem

Ispitivanje opterećenjem je metoda koja uključuje opterećivanje spoja većim naprezanjem od onog predviđenog tijekom eksploatacije, ali bez uzrokovanja trajnih deformacija. Cilj metode je potvrditi proračun konstrukcije, provjeriti kvalitetu materijala te osigurati sposobnost sklopa da izdrži maksimalno opterećenje. Opseg opterećenja i ispitivanja mora biti definiran unaprijed u skladu s relevantnim normama i zahtjevima.

Metoda može uključivati statička ili dinamička opterećenja, a ispitivanja se provode na ambijentalnoj ili unaprijed definiranoj temperaturi. Ovisno o rezultatima, metoda može biti nerazorna (bez razaranja spoja) ili razorna (s razaranjem spoja).

Primjene ispitivanja uključuju:

- tlačna ili vlačna ispitivanja (vlačno opterećenje obično 20 % veće od maksimalnog),
- hidrostatska i pneumatska ispitivanja (praćenje istjecanja),
- centrifugalna ispitivanja,
- ispitivanja toplinskim šokovima ili temperaturnim ciklusima,
- ostale specifične metode.

Tijekom ispitivanja potrebno je pratiti dimenzijske promjene i provoditi vizualne preglede. Za proizvode koji podliježu standardima treba osigurati usklađenost sa svim zahtjevima.

#### 4.1.7 Termografska metoda

Ovo je relativno nova metoda koja se koristi i uključuje istraživanje raspodjele topline kroz spoj i može otkriti samo područja koja nisu dobro spojena pa ne provode dobro toplinu. Ispitivanje se vrši odmah pri izlasku iz peći u kojoj je potrebno predmet zagrijati na točnu temperaturu i temperatura mora biti ujednačena po cijelom komadu. Temperatura se prati i zapisuje ručno ili automatski, mjerenje se vrši termalnim kamerama.[13]

Termografska metoda ispitivanja ima nekoliko ograničenja. Glavno ograničenje je detekcija nepravilnosti koje su ograničene na područje blizu površine, dok dublje greške često ostaju neprimijećene. Vanjski čimbenici poput temperature okoline, vlage i protoka zraka mogu značajno utjecati na točnost rezultata, dok toplinska svojstva materijala, otežavaju analizu kod slojevitih ili heterogenih struktura. Metoda zahtijeva preciznu kalibraciju uređaja i dobro poznavanje karakteristika materijala. Osim toga, interpretacija termografskih slika zahtijeva visoku razinu stručnosti kako bi se izbjegli pogrešni zaključci. Unatoč tim poteškoćama, metoda je vrlo korisna za nerazorna ispitivanja površinskih nepravilnosti.[4,13]

## 4.2 Razorna ispitivanja tvrdo lemljenih spojeva

Tvrdo lemljeni sklopovi koriste se na različitim mjestima i na različite načine su opterećeni, pa su zahtjevi dizajna za svaki sklop posebni i vrlo se razlikuju pa ispitivanja koja su osmišljena možda neće biti dovoljna za ispitivanje nekog sklopa koji ima drugačije zahtjeve.

Razorne metode ispitivanja ključne su za procjenu svojstava tvrdo lemljenih spojeva, pružajući detaljan uvid u njihovu čvrstoću, pouzdanost i otpornost na različite vrste opterećenja. Za razliku od nerazornih metoda, koje omogućuju pregled spojeva bez njihovog oštećenja, razorne metode uključuju namjerno uništavanje ispitnih uzoraka kako bi se dobile kvantitativne ili kvalitativne informacije o njihovim mehaničkim i strukturnim svojstvima. Cilj ovih ispitivanja je potvrditi da spojevi zadovoljavaju propisane standarde, tehničke specifikacije i zahtjeve sigurnosti, osiguravajući njihovu funkcionalnost u stvarnim uvjetima primjene. Odabir odgovarajuće razorne metode ovisi o specifičnostima spoja, uvjetima eksploatacije i kriterijima koji se ocjenjuju, čime se osigurava da rezultati pružaju relevantne i točne informacije za procjenu kvalitete i pouzdanosti lemljenog spoja. [12]

Razorna ispitivanja su sljedeća [12]:

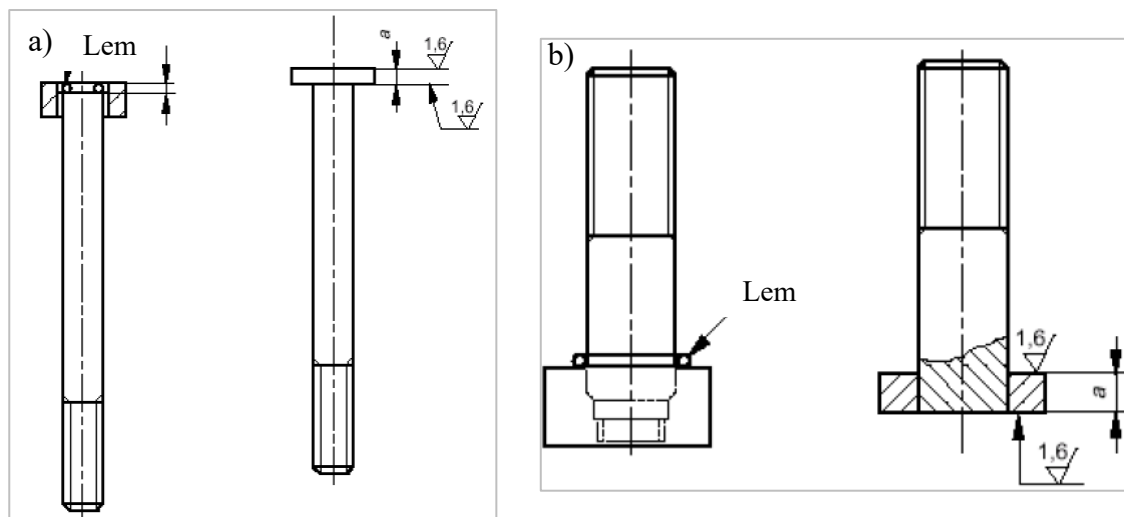
1. smično ispitivanje
2. vlačno ispitivanje
3. metalografsko ispitivanje
4. ispitivanje tvrdoće
5. ispitivanje ljuštenjem
6. ispitivanje na savijanje

### 4.2.1 Smično ispitivanje

Za dobivanje podataka o smičnoj čvrstoći tvrdo lemljenih spojeva koriste se različite konfiguracije ispitnih uzoraka. Budući da je većina lemljenih spojeva projektirana za podnošenje smičnih opterećenja, podaci dobiveni iz sučeljenih spojeva nisu pouzdani za točno određivanje njihove čvrstoće na smicanje. Razlog tome je što sučeljeni spojevi uglavnom prenose vlačna ili tlačna opterećenja, dok se u realnim uvjetima lemljeni spojevi najčešće izlažu

smičnim silama. Zbog toga se pri ispitivanju mehaničkih svojstava spojeva trebaju koristiti metode koje bolje simuliraju stvarne uvjete opterećenja, kako bi se osigurala točnost i relevantnost rezultata za praktičnu primjenu. Izrada standardnih uzoraka za ispitivanje smične čvrstoće iz lemljenih sklopova može biti tehnički zahtjevana. Ispitni uzorak za smicanje trebao bi biti jednostavan za konstruiranje, praktičan za proizvodnju i ekonomičan za ispitivanje. [12]

Princip ove metode je ispitivanje uzorka prilikom mehaničkog naprezanja do odreza i zatim analizirati i procijeniti njegova mehanička svojstva kad je opterećen na ove metode opterećenja. Sama metoda mora biti sprovedena prema normi HRN EN ISO 5817:2014. Točni detalji o ispitnim uzorcima na kojima će se sprovesti ispitivanje moraju biti dogovoreni prije samog ispitivanja i mogu biti dva osnovna tipa kao što je prikazano na Slici 10.



Slika 10 Dva različita tipa ispitnih uzoraka [12]

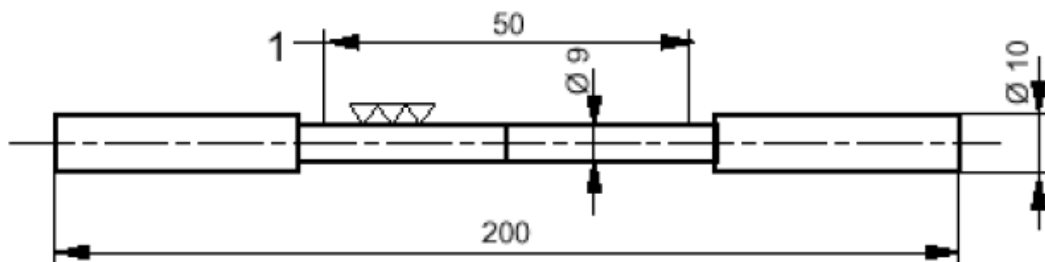
Rezultati ispitivanja i informacije koje treba navesti u izvješću trebaju uključivati sljedeće: ispitni uzorak i pojedinosti uključujući dimenzije, tolerancije, zazor između dva materijala koji se leme i metodu pripreme, reference poput broja ugovora, broja dijela, mjesta na konstrukciji prema potrebi, datum ispitivanja, dodatni materijal, osnovni materijali, pojedinosti o procesu lemljenja, vrsta ispitnog uzorka, broj ispitnih uzoraka, vrsta ispitnog stroja, temperatura ispitivanja, numerički rezultati, položaj loma, izgled površine loma uključujući nepravilnosti ako je lom u lemljenom spoju, naziv laboratorija i ovlaštenu potpis. [12]



## 4.2.2 Vlačno ispitivanje

Za određivanje vlačnih svojstava tvrdo lemljenih spojeva koriste se razni oblici ispitnih uzoraka, pri čemu je ključno osigurati jednostavnost izrade i ekonomičnost ispitivanja. Rezultati ispitivanja moraju se procijeniti prema zahtjevima norme HRN EN ISO 6892-1:2019 i specifičnostima svakog pojedinačnog ispitivanja. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti nepravilnostima poput nepovezanih područja, koje se mogu otkriti nerazornim metodama ispitivanja ili vizualnim pregledom površine loma, osobito u slučajevima velikog rasipanja rezultata.

Načelo ispitivanja temelji se na primjeni vlačnog opterećenja na ispitni uzorak do loma, kako bi se procijenila njegova mehanička svojstva u uvjetima takvog opterećenja. Prije početka ispitivanja, potrebno je definirati detalje uzoraka i njihovu prilagodbu specifičnim primjenama. Standardni tipovi uzoraka uključuju različite konfiguracije koje su prikazane u tehničkim nacrtima, no dimenzije se mogu prilagoditi prema potrebama ispitivanja (Slika 11). [12]



Slika 11 Ispitni uzorak kod vlačnog ispitivanja [12]

Postupak se provodi prema načelima normi ISO 5187 i HRN EN ISO 6892-1:2019, koristeći uređaje s podesivim stezaljkama kako bi se izbjegla nenamjerna savojna naprezanja koja mogu utjecati na točnost rezultata. Na ovaj način osigurava se preciznost i pouzdanost dobivenih podataka, što je ključno za procjenu kvalitete lemljenih spojeva u tehničkim i industrijskim primjenama.

### 4.2.3 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja predstavljaju ključnu metodu analize tvrdo lemljenih spojeva, pružajući uvid u njihovu mikrostrukturu, kvalitativna i kvantitativna svojstva, te eventualne nepravilnosti. Ova metoda omogućuje procjenu homogenosti spoja, analizu područja difuzije između osnovnog i dodatnog materijala, te identifikaciju potencijalnih grešaka poput pora, pukotina ili uključaka, koji mogu utjecati na mehanička i strukturna svojstva spoja. [12]

Prvi korak metalografskog ispitivanja uključuje pripremu uzorka, što podrazumijeva precizno rezanje, brušenje i poliranje kako bi se dobila ravna i glatka površina pogodna za analizu. Nakon pripreme, površina uzorka tretira se odgovarajućim kemijskim reagensima u procesu poznatom kao nagrivanje, čime se otkriva mikrostruktura materijala. Izbor reagensa ovisi o vrsti osnovnog i dodatnog materijala, kao i o specifičnim informacijama koje se žele dobiti ispitivanjem. [12]

Metalografska analiza obično se provodi korištenjem svjetlosne mikroskopije, koja omogućuje pregled spoja pri različitim uvećanjima. Metalografska ispitivanja tvrdo lemljenih spojeva predstavljaju nezamjenjivu tehniku za osiguranje njihove funkcionalnosti, dugotrajnosti i pouzdanosti. Preciznost i dubina podataka dobivenih ovom metodom čine je osnovnim alatom u industrijama gdje su čvrstoća i kvaliteta spojeva od kritične važnosti. [12]

### 4.2.4 Ispitivanje tvrdoće

Puno rezultata ispitivanja tvrdoće na lemljenim spojevima daje različite rezultate koje je ponekad teško usporediti, ali je moguće empirijski određenim tablicama usporediti podatke i dati približni rezultat za drugu vrstu materijala. Često se koristi kod ispitivanja osnovnih materijala da se utvrdi efikasnost toplinske obrade i difuznosti između materijala. Princip ovog ispitivanja isti je kao kod ispitivanja tvrdoće i ispitivanja zakaljivosti materijala. Postupak se temelji na izradi otiska pomoću standardiziranog opterećenja, pri čemu se veličina otiska, zajedno s primijenjenom silom, koristi za određivanje tvrdoće površinskog sloja materijala. Metode koje se koriste za ispitivanje i to prema normi su:

- ispitivanje tvrdoće po Vickersu skladu s normom HRN EN ISO 6507-1;
- ispitivanje tvrdoće po Brinellu u skladu s normom HRN EN ISO 6506-1:2014;
- ispitivanje tvrdoće po Rockwellu u skladu s normom HRN EN ISO 6508-1:2024. [12]

Ispitivanje tvrdoće tvrdo lemljenih spojeva omogućuje detaljnu procjenu kvalitete spoja i metalurških svojstava osnovnih i dodatnih materijala, što je ključno za osiguranje pouzdanosti i dugotrajnosti komponenata. Primjena različitih metoda ispitivanja, poput Vickersove, Brinellove i Rockwellove, prilagođava se specifičnim zahtjevima analize, pružajući uvid u mehanička svojstva i učinkovitost proizvodnih procesa.

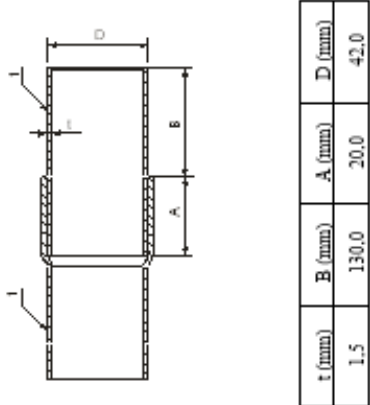
## 5 Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu završnog rada obrađen je postupak ispitivanja kvalitete zadanog uzorka u skladu s normom HRN EN 12797:2001/A1:2008 za razorne metode ispitivanja. Cilj je brzom i ekonomičnom metodom pregledati slike presjeka uzoraka na makroizbruscima kako bi se ustanovili nedostaci i greške na spoju. To je učinkovit alat u procjeni kvalitete zalemljenog spoja pa se često koristi u praksi. Smisao provedbe eksperimenta je potvrditi spomenutu učinkovitost metodologije i pokazati na stvarnom uzorku primjenjivost ove metode. Rezultat eksperimentalnog dijela je donošenje zaključka te izrada ispitnog izvješća kojim se potvrđuje kvaliteta ili utvrđuju nedostaci uzorka.

### 5.1 Osnovne informacije o uzorku

Specifikacija postupka lemljenja definirana prema normi HRN EN 13134:2001 predstavlja detaljan plan rada za proces tvrdog lemljenja spoja bakrenih cijevi, kao što je prikazano na Slici 12. Ova metoda lemljenja koristi se za osiguravanje čvrstog i pouzdanog spoja, posebno u industrijskim sustavima gdje je kvaliteta i preciznost ključna. Materijal korišten u ovom postupku uključuje bakrene cijevi proizvođača ELVALHALCOR te dimenzija  $\varnothing 42 \times 1,5$ . Za spajanje se primjenjuje dodatni materijal tipa A 3005 V EASY FORM (CuP281) odnosno legura bakra i fosfora, u obliku šipke promjera 2,0 mm.

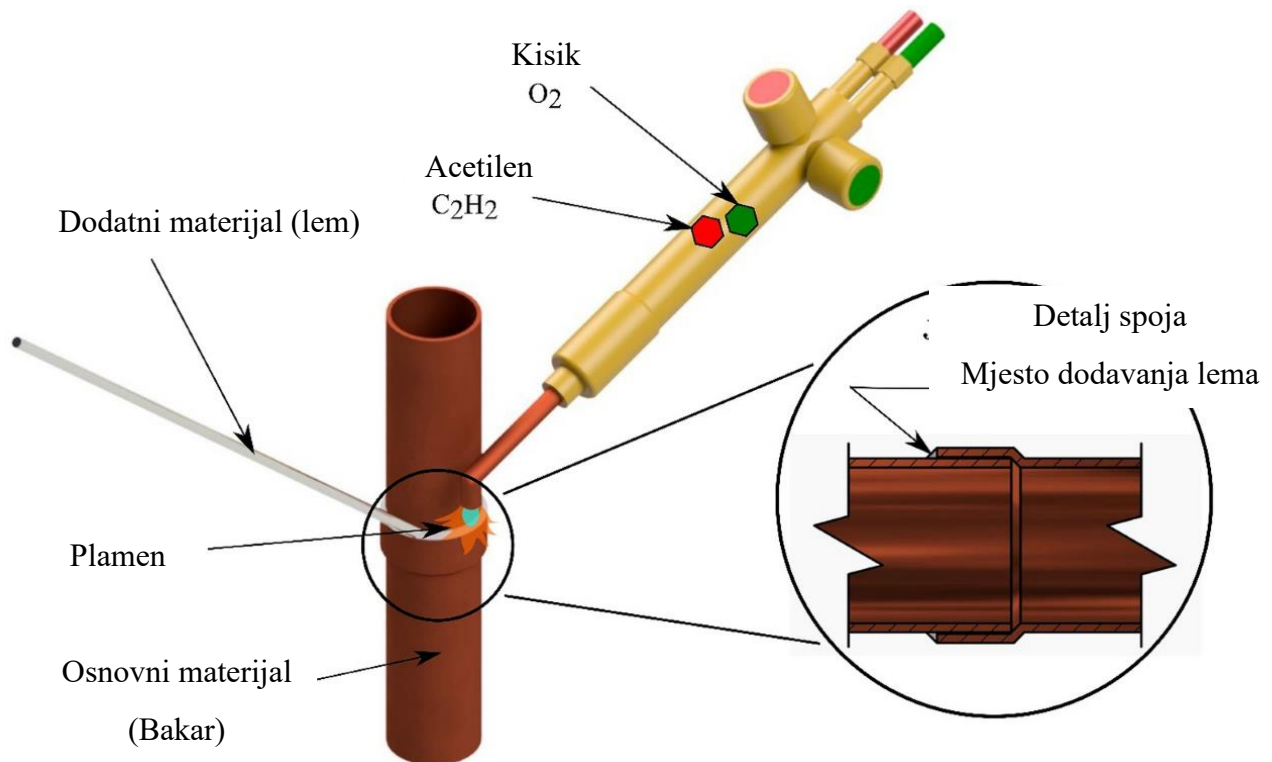
Specifikacija jasno definira da se proces odvija u kontroliranim uvjetima uz održavanje razmaka između stijenki spoja kako bi se omogućilo kapilarno djelovanje rastaljenog dodatnog materijala/lema. Priprema spoja obuhvaća precizno rezanje cijevi pomoću alata Rems, Rothenberger rezača te čišćenje spojnih površina odmašćivanjem otopinom Rovlies i ispiranje vodom. Kao postupak lemljenja koristi se tvrdo lemljenje plinskim plamenom (oznaka 912 prema normi HRN EN ISO 4063:2012), s primjenom smjese plina acetilena ( $C_2H_2$ ) i kisika ( $O_2$ ) pri definiranim tlakom (acetilen:  $p = 0,5$  bar; kisik:  $p = 4$  bar). Vrsta plamena za lemljenje je mekani neutralni. Ključni parametri uključuju temperaturu lemljenja, koja se kontrolira pomoću laserskog termometra, kako bi se osigurala temperatura od maksimalno  $800^\circ C$ .

<b>Specifikacija postupka lemljenja „BPS“</b> <b>HRN EN 13 134</b>		Stranica: 1 Uk.br.str.: 1 Revizija br.: 1								
1. <b>Proizvođač:</b>		16. <b>Ovlašteno tijelo:</b>								
2. <b>Adresa:</b>		17. <b>Metoda pripreme spoja:</b> Cu rezač cijevi Rams,Rothenberger								
3. <b>Broj dokumenta (BPS):</b> 04/22 – Cu/Cu		18. <b>Čišćenje prije lemljenja:</b> Odmašćeno čisto s Rovlies								
4. <b>Broj BPAR:</b> /		19. <b>Čišćenje nakon lemljenja:</b> Oprati vodom								
5. <b>Broj ispitnih komada:</b>		20. <b>Unutarnje čišćenje:</b> Cetkom odgovarajućeg promjera								
6. <b>Klasifikacija lemljenja:</b> EN ISO 13585		21. <b>Dodani materijal za lemljenje – forma:</b> Šipkica								
7. <b>Proces lemljenja:</b> 912		– tip: A 3005 V EASY FORM - CuP281, Ø 2,0 mm								
8. <b>Osnovni materijal 1:</b> 31		– način ubacivanja lema u spoj: Tijekom grijanja								
9. <b>Osnovni materijal 2:</b> 31		– mjesto lemljenja u spoju: u zazor između stjenki								
10. <b>Debljina stijenke (mm):</b> 1,5		22. <b>Način spoja:</b> Spoj Cu-Cu								
11. <b>Promjer cijevi (mm):</b> 42,0		– tip:								
12. <b>Fiting – oznaka, Kvaliteta (T-komad, spojnic):</b> Cijev - CU		– način ubacivanja lema u spoj: Ručni								
13. <b>Toplinska obrada prije i poslije postupka lemljenja:</b> Otvoreni plamen		– mjesto lemljenja u spoju: u zazor između stjenki								
14. <b>Detalji pripreme i pričvršćenja: način pričvršćenja na poziciji VD</b>		23. <b>Mjerenje temperature (kontrola i postava sonde):</b> Laserski Termometar - Promatrati boju Cu-a								
15. <b>Detalji izgleda spoja:</b> Temperatura okoline: iznad 5°C Tolerancija spoja – pri temp. okoline : max. 0,24 mm – pri temp. lemljenja : min. 0,02 mm		24. <b>Vremenski rok lemljenja:</b>								
 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>t (mm)</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>B (mm)</td> <td>130.0</td> </tr> <tr> <td>A (mm)</td> <td>20.0</td> </tr> <tr> <td>D (mm)</td> <td>42.0</td> </tr> </table>		t (mm)	1.5	B (mm)	130.0	A (mm)	20.0	D (mm)	42.0	25. <b>Veličina / broj plamenika (dizna):</b> 2-4
t (mm)	1.5									
B (mm)	130.0									
A (mm)	20.0									
D (mm)	42.0									
		26. <b>Smjesa plina (tip, tlak):</b> Acetilen - C2H2, p=0,5bar=50kPa								
		27. <b>Oksidacijski plin (tip, tlak):</b> Kisik - O2, p=4bar=0,4MPa								
		28. <b>Vrsta plamena:</b> Mekani neutralni								
		29. <b>Zagrijati prije lemljenja:</b> T max=800°C								
		30. <b>Izvor energije (tip, parametri):</b>								
		31. <b>Indukcijski svitak (konstr. tip):</b>								
		32. <b>Izrada elektroda:</b>								
		33. <b>Postavke uređaja (tlak elektroda, struja, vrijeme):</b>								
		34. <b>Atmosfera (tip, čistoća, parametri), protok:</b>								
		35. <b>Tlak vakuuma:</b>								
		36. <b>Okolina plina (tip, tlak):</b>								
		37. <b>Sastav teku:</b>								
38. <b>Br.poz.</b>	39. <b>Materijal</b>	40. <b>Proizvođač, veličina</b>	41. <b>Broj komada</b>	42. <b>Norma</b>	43. <b>Napomena</b>					
1	Cu-cijev	EL VALHALCOR-Ø42x1,5	2	EN 1057						
2	Cu-cijev	EL VALHALCOR-Ø42x1,5	2							
44. <b>Dodatni uvjeti i napomene:</b> Proces: Očistiti spoj, sastaviti prema slici, grijati do temperature lemljenja, lemiti, hladi se na zraku i isprati vodom  Terminologija na engleskom i njemačkom jeziku, vidi drugu stranicu, „Englisk“ on second side, „Deutsch“ siehe Rückseite										
45.			47. <b>Nadzorno inspekcijsko tijelo:</b>							
46. <b>Datum, potpis</b>			48. <b>Datum, potpis i pečat inspekcijskog tijela</b>							

Slika 12 Potrebni podaci prije ispitivanja

Spoj koji se obrađuje je cijevi promjera 42 mm. Jedna od cijevi proširena kako bi se oblikovao spoj u obliku zvona odnosno proširena je kako bi se druga cijev umetnula (Slika 13). Maksimalna dopuštena tolerancija pri temperaturi okoline su 0,24 mm, dok je pri temperaturi

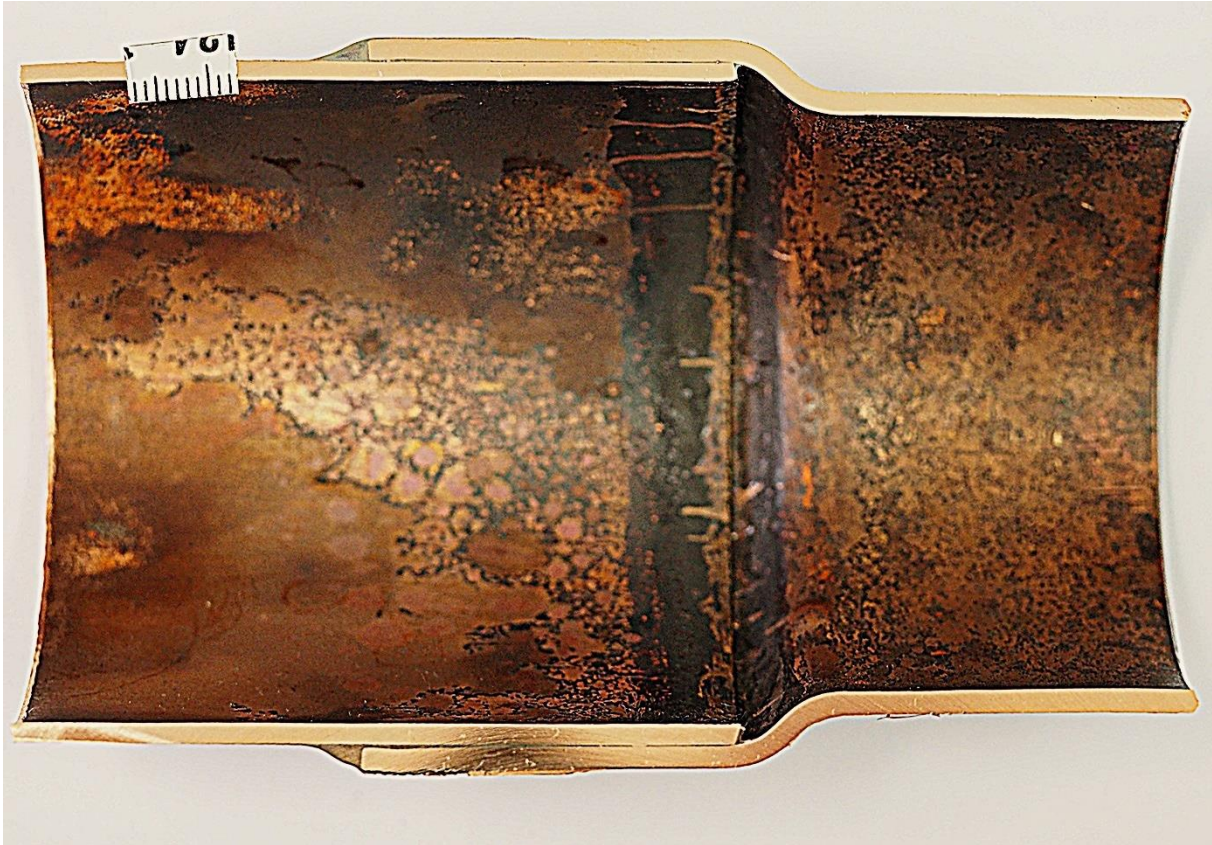
lemljenja minimalna tolerancija 0,02 mm. Stabilnost spoja tijekom procesa osigurava se ručnim ubacivanjem dodatnog materijala u zazor između stijenki. Navedeni postupak lemljenja ne samo da osigurava čvrstoću i dugotrajnost spoja već ističe važnost preciznosti i kontrole u svakom koraku, od pripreme materijala do završne inspekcije spoja. Ova dokumentacija pruža jasan okvir za izvođenje visokokvalitetnog lemljenja, čime se osigurava pouzdanost sustava u kojem se spojevi koriste.



Slika 13 Postupak lemljenja uzorka

## 5.2 Analiza makroizbruska

Ispitivani uzorci najprije su prerezani na dva dijela i svaki od njih je poliran do visokog sjaja kako bi se jasno vidjele različite faze, odnosno, kako bi se vidjela razlika između osnovnog i dodanog materijala. Kako je osnovni materijal bakar karakteristične smeđo-narančaste boje, vizualno je jednostavno utvrditi razliku dodatnog materijala koji je legura bakra i fosfora te ima specifičnu sivkastu boju (Slika 14).



*Slika 14 Makroizbrusak na kojem se vrši vizualni pregled*

Pri analizi makroizbruska sljedeće stvari treba posebno uzeti u obzir:

### 5.2.1 Mogući ostaci talila

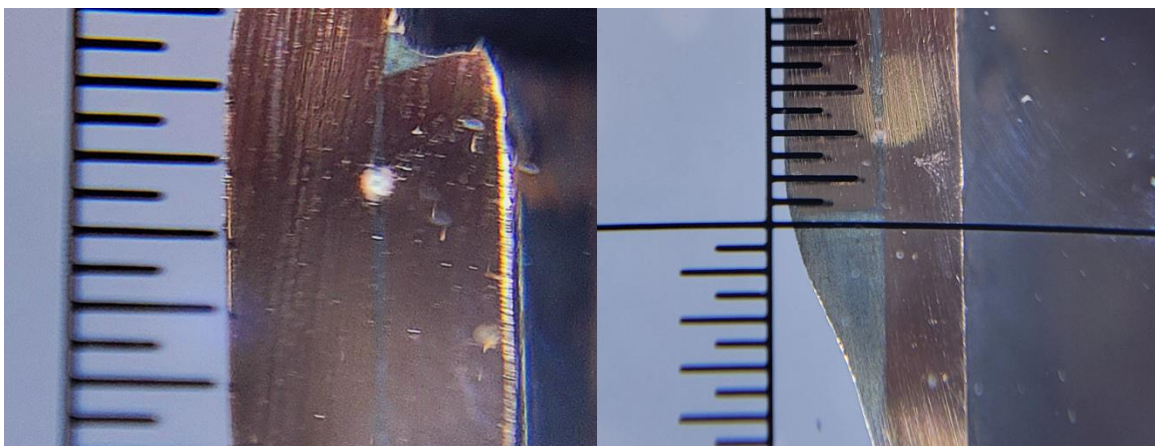
Na slici 15 su vidljive crne mrlje oko samog spoja i s vanjske strane kao i s unutarnje strane uzorka, što znači da ima ostataka talila (Slika 15). Još se može zapaziti da po cijelom uzorku ima oksidiranih dijelova koji su nastali zbog povišene temperature. U propisanoj normi (navesti kojoj) stoji da se ostaci talila uklanjaju prije same inspekcije kako bi sam spoj bio bolje vidljiv. Za potrebe ove analize nije potrebno skidati ostatak talila, ali ukoliko se ovakav spoj koristi u primjeni gdje dolazi u kontakt s korozivski jakim kemikalijama ili tekućinama koje u spoju s talilom mogu ubrzati postupak korozije i ugroziti strukturni integritet spoja to bi bilo svakako preporučljivo. Također, oksidirani dijelovi trebaju se ukloniti kako bi se smanjio potencijal korozije u eksploataciji proizvoda.



Slika 15 Unutarnja i vanjska površina uzorka

### 5.2.2 Vidljive nepravilnosti i nedostaci

Sljedeća stvar na koju treba obratiti pozornost prilikom vizualnog pregleda makroizbruska su nepravilnosti, a to su pore, uključci, šupljine i pukotine. Na jednom od tri uzorka se može vidjeti da postoje dvije nepravilnosti. Samo vizualnim pregledom i pomoćnim sredstvom povećalom ne može se jasno utvrditi radi li se o šupljini ili uključku koji se našao između dva materijala. Tek naknadnim pregledima pomoću ultrazvuka ili radiografskom metodom dobije se dovoljno informacija za donijeti zaključak. Ovo je osnovna svrha provođenja ove metoda ispitivanja uzoraka, kako bi se vidjela greška u spoju i procijenila treba li uzorak daljnju provjeru. Norma nalaže da sve prisutne nepravilnosti moraju biti manje od 0,5 mm. Na Slici 16 se može jasno vidjeti da je prisutna nepravilnost zadovoljavajuće veličine ( $< 0,5$  mm). Norma isto tako nalaže mogućnost detaljnijeg ispitivanja za nepravilnosti i manje od dopuštene minimalne veličine, što ovisi o eksploatacijskim uvjetima krajnjeg proizvoda.

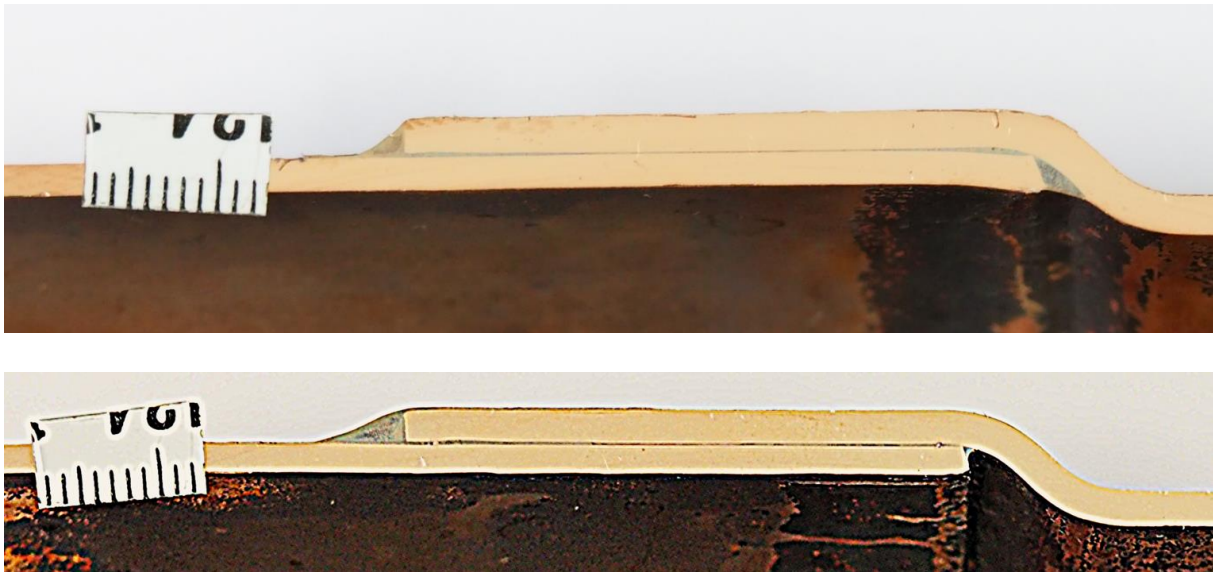


Slika 16 Pronađene greške na uzorcima



### 5.2.3 Kontinuitet lemljenog spoja

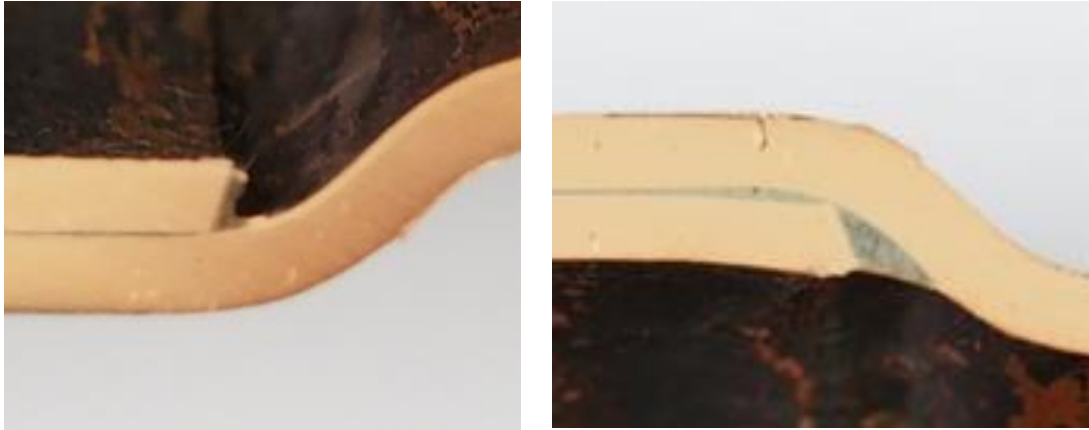
Na Slici 17 prikazani su spojevi promatranih uzoraka. Spojevi su po cijeloj dužini ujednačeno ispunjeni dodatnim materijalom, odnosno kontinuirano su ispunjeni na spojnom mjestu. To što su spojevi ispunjeni znači da je temperatura zagrijavanja bila ujednačena, površina dobro nakvašena talilom, zazor između cijevi je bio odgovarajući kako se ne bi ugrozilo kapilarno djelovanje, te je dodano dovoljno lema kako bi se kapilarnim djelovanjem ispunila površina.



*Slika 17 Uzorci sa kontinuiranim lemljenim spojem*

### 5.2.4 Udubljeni rub spoja

Na uzorku prikazanom na Slici 18 lijevo može se vidjeti da unutarnji spoj ispunjen u manjoj količini lemom negoli je spoj na desnoj slici. To se dogodilo zbog neujednačene topline ili nedovoljno materijala koji nije prošao kapilarnim djelovanjem do drugog izlaza kako bi se formirao zaobljeni spoj. Za razliku od toga Slika 18 desno prikazuje potpuno ispunjen i formiran zaobljeni spoj.



*Slika 18 Usporedba nepravilno oblikovanog korijena (lijevo) i pravilno oblikovanog (desno)*

### 5.2.5 Višak dodatnog materijala

Višak dodatnog materijala, ukoliko ne predstavlja tehnički problem i ne ometa normalno funkcioniranje proizvoda, odnosno ne smeta prolasku fluida ili ne smeta za ostala ispitivanja nije potrebno ga uklanjati. Ukoliko ometa bilo koji aspekt funkcionalnosti potrebno ga je izbrusiti ili ukloniti nekim drugim postupkom. Na vanjskoj površini uzorka (Slika 19) može se vidjeti da se višak dodatnog materijala razlijao po osnovnom materijalu. Na ovom uzorku može se reći da je problem više estetski negoli je funkcionalni.



*Slika 19 Prednja strana uzorka*

### 5.3 Zaključak provedene analize

Kod spajanja bakrenih cijevi tvrdim lemljenjem vrlo je važno provjeriti dovršeni spoj vizualnim pregledom i jednostavnim testovima nepropusnosti. Vizualan pregled makroizbruska uzoraka se radi kako bi se najekonomičnije i najbrže uočile greške lemljenih spojeva na proizvodima. Kvalitetan lem trebao bi tvoriti neprekinuti prsten duž cijelog oboda spoja, bez vidljivih pora, pukotina ili izbočina. Budući da je za to ispitivanje dovoljno imati adekvatan izvor svjetlosti i povećalo dovoljno učinkovito može se uočiti veliki raspon grešaka i nedostataka. Kod pronalaska greške iskusan ispitivač može procijeniti hoće li pronađena greška na radnom komadu utjecati na životni vijek i funkcionalnost proizvoda te treba li predmet pregleda odbaciti ili prema normativnim smjernicama zadovoljava, odnosno greške su unutar zadanih parametara. Također na taj način se može utvrditi je li potrebno napraviti neka druga ispitivanja koja bi potvrdila ili osporila postavljene zaključke. Ako je potrebno, cijevi se mogu opteretiti tlakom kako bi se uvjerali u stabilnost i izdržljivost spoja. Postupno hlađenje, umjesto naglog uranjanja u hladnu vodu, dodatno smanjuje rizik od stvaranja napetosti i neželjenih deformacija.

Prilikom provedbe analize makrostrukture na dostupnim uzorcima zaključeno je da su radni komadi napravljeni zadovoljavajuće. Uočeni su neki nedostaci koji možda nemaju funkcionalnu grešku i neće uzrokovati grešku u eksploatacijskom životu proizvoda.

Pridržavanje navedenih smjernica, praćeno redovitom kontrolom i dokumentiranjem procesa, osigurava da tvrdo zalemljeni spojevi bakrenih cijevi budu pouzdani, izdržljivi i u skladu sa svim zahtjevima norme.

## 6 Zaključak

Ovaj rad temeljito analizira tvrdo lemljenje kao jednu od ključnih tehnika spajanja komponenti u nerastavljive spojeve. Kroz teorijsku analizu i eksperimentalni dio, obuhvaćene su sve faze postupka, uključujući odabir materijala, metode zagrijavanja, primjenu talila te različite tipove spojeva. Također je detaljno obrađen pregled normativnih postupaka ispitivanja kvalitete spojeva, pri čemu je posebna pažnja posvećena vizualnom pregledu prema normi HRN EN 13134:2001.

Eksperimentalni dio rada potvrdio je važnost vizualne analize makroizbrusaka radi identificiranja nedostataka i grešaka na spoju te u otkrivanju nepravilnosti kao što su ostaci talila, udubljeni korijen šava ili višak dodatnog materijala, koji mogu utjecati na funkcionalnost spoja. Ispitivani uzorci zadovoljavaju normativne zahtjeve za kvalitetom, ali u završnom dijelu zaključka na temelju dobivenih rezultata predložene su preporuke za dodatna ispitivanja kvalitete te postupanja s tvrdo lemljenim spojevima s ciljem poboljšanje kvalitete konačnog proizvoda i smanjenje proizvodnih nepravilnosti.

Zaključno, tvrdo lemljenje ostaje nezamjenjiva tehnologija u industrijama poput zrakoplovne, automobilske i elektroničke. Njegova široka primjena i kontinuirani razvoj ukazuju na važnost standardizacije i kontrolnih metoda koje osiguravaju visoku kvalitetu spojeva. Daljnja istraživanja mogu se usmjeriti na optimizaciju procesa i primjenu novih materijala kako bi se dodatno poboljšala učinkovitost i pouzdanost tehnologije tvrdog lemljenja.

## 7 Literatura

- [1] American Welding Society: Brazing handbook Fourth Edition, American Welding Society, 1991.
- [2] Schwartz, M. M.: Brazing. ASM international. 2003.
- [3] HRN EN ISO 4063:2023 Zavarivanje i srodni postupci -- Nomenklatura postupaka i referentni brojevi
- [4] M. Parać, "Razvoj tehnologije tvrdog lemljenja", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:790616>
- [5] HANSEL, Dave. Abrasive blasting systems. *Metal Finishing*, 98.7: 23-37. 2000.
- [6] Klas Weman: "Gas Welding and Brazing," Welding Processes Handbook. 2012.
- [7] Garašić I.: Podloge za predavanja iz kolegija Zavarivanje i montaža, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Preuzeto s e-učenja. 2024.
- [8] American Welding Society: Welding handbook, Ninth Edition, Volume 2, 2004.
- [9] HRN EN ISO 18496:2021 Tvrdo lemljenje -- Talila za lemljenje -- Razredba i tehnički uvjeti isporuke
- [10] HRN EN 13134:2001 - Lemljenje -- Odobravanje postupka (EN 13134:2000)
- [11] EN 13133:2001 - Tvrdo lemljenje -- Provjera sposobnosti lemlaca (EN 13133:2000)
- [12] HRN EN 12797:2001/A1:2008 - Tvrdo lemljenje -- Razorna ispitivanja zalemljenih spojeva ( EN 12797:2000/A1:2003)
- [13] HRN EN 12799:2001 - Tvrdo lemljenje -- Nerazorno ispitivanje zalemljenih spojeva (EN 12799:2000)
- [14] Naprava za stezanje lemljenog spoja. <https://www.indiamart.com/proddetail/custom-welding-brazing-fixture-2849318282748.html> pristup: 12.01.2025
- [15] Ciglar Igor: Spajanje materijala – lemljenje. Skripta za praktičnu nastavu, Srednja škola Konjščina. 2024.

[16] Lemljenje u peći. <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/furnace-brazing/> pristup: 12.01.2025.

[17] Indukcijsko lemljenje. <https://www.ambrell.com/blog/all> pristup: 12.01.2025.

[18] Mookam, Niwat: Optimization of resistance spot brazing process parameters in AHSS and AISI 304 stainless steel joint using filler metal. Defence Technology. 15. 2019.

[19] Tamjidi, M. & Danesh narooei, Khashayar: Investigating the Effect of Considering Different Cross Section Design in Friction Stir Welded Joint Line of Dissimilar Aluminum Alloys. International Journal of Engineering. 36. 19-27. 2023.

[20] Naz, Nausheen & Tariq, Fawad & Baloch, Rasheed.: Failure analysis of HAZ cracking in Low C-CrMoV steel weldment. Journal of Failure Analysis and Prevention. 9. 370-379. 2009.

[21] SONOTEC GmbH Application Note: Ultrasonic Steel Weld Testing. e-Journal of Nondestructive Testing. <https://www.ndt.net/?id=24825> Datum pristupa: 12.01.2025.