

# CMT zavarivanje pocinčanih limova

---

**Daničić, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:964626>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Daničić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Filip Daničić

Zagreb, 2019.

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

Filip Daničić

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, osoblju Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za zaštitu materijala i Laboratorija za materijalografiju na pomoći pri izradi rada.

Posebno hvala asistentici, dr. sc. Maji Jurici, na svim savjetima, kritikama i pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na ukazanoj potpori i razumijevanju tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **FILIP DANIČIĆ** Mat. br.: 0035202377

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **CMT ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CMT WELDING OF ZINC COATED STEELS**

Opis zadatka:

Opisati i analizirati CMT – Cold Metal Transfer prijenos metala u električnom luku te navesti njegove prednosti i primjenu u industriji. Proučiti primjenu pocinčanih limova u različitim granama industrije i opisati specifičnosti i način nanošenja cinkove prevlake na osnovni materijal. S obzirom na literaturne podatke procijeniti mogućnost zavarivanja pocinčanih limova opisanim prijenosom metala.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za zavareni spoj pocinčanih limova malih debljina izveden CMT prijenosom metala ocijeniti kvalitetu zavara. Isto tako potrebno je odrediti utjecaj postupka zavarivanja na debljinu i širinu pocinčanog sloja. U konačnici, potrebno je ocijeniti primjenjivost CMT postupka za zavarivanje pocinčanih limova malih debljina, kao i eventualne preporuke u vidu poboljšavanja kvalitete zavarenog spoja.

Zadatak zadan:  
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 22. veljače 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.  
**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.  
**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

---

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. MIG/MAG ZAVARIVANJE .....	2
2.1. Prijenos metala kratkim spojevima .....	3
3. CMT – COLD METAL TRANSFER .....	5
3.1. Princip rada CMT zavarivanja .....	5
3.2. Prednosti CMT zavarivanja.....	8
3.3. Unos topline kod CMT-a i kombinacije.....	9
3.3.1. Prijenos metala impulsnim strujama .....	9
3.3.2. CMT zavarivanje u kombinaciji s impulsnim načinom prijenosa metala.....	10
3.4. Ograničenja primjene CMT-a .....	11
3.5. Sustav za CMT zavarivanje.....	12
3.6. Primjena CMT-a.....	15
4. POCINČANI LIMOVI.....	18
4.1. Cink i njegove prevlake.....	18
4.2. Pocinčani limovi.....	19
4.3. Priprema površine metala.....	20
4.3.1. Mehanička obrada .....	21
4.3.2. Kemijska obrada.....	21
4.3.3. Elektrokemijska obrada.....	22
4.3.4. Odmašćivanje .....	22
4.4. Postupci pocinčavanja .....	23
4.4.1. Vruće uranjanje .....	23
4.4.2. Elektrokemijsko nanošenje cinka .....	25
4.4.3. Kemijsko nanošenje cinka.....	26
4.4.4. Šeradiranje (difuzijsko pocinčavanje).....	26
4.4.5. Raspršivanje cinka.....	26
4.5. Primjena pocinčanih limova.....	28
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	31
5.1. Opis eksperimenta .....	31
5.2. Priprema spoja.....	31
5.3. Oprema .....	32

5.3.1. Osnovni materijal .....	35
5.3.2. Dodatni materijal.....	35
5.3.3. Zaštitni plin .....	37
5.4. Tehnološki i tehnički podaci o radnim komadima i postupku zavarivanja.....	38
5.5. Mjerenje debljine sloja cinka .....	38
5.6. Postupak zavarivanja.....	40
5.7. Priprema i ispitivanje makroizbrusaka.....	43
6. ZAKLJUČAK .....	48
7. LITERATURA.....	49



## POPIS SLIKA

Slika 1 Oprema za MAG zavarivanje [4] .....	3
Slika 2 Shematski prikaz povratnog gibanja žice [1] .....	5
Slika 3 Prikaz povratnog hoda žice pri CMT zavarivanju [1].....	6
Slika 4 Promjene napona (gore) i struje (dolje) u vremenu za vrijeme CMT zavarivanja [1]... 7	7
Slika 5 Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [9] .....	9
Slika 6 Promjene u penetraciji i geometriji spoja za različite omjere CMT ciklusa i strujnih impulsa. Broj impulsa između dvaju CMT ciklusa se mijenja [1].....	10
Slika 7 Dijagram napon-struja koji obuhvaća klasične načine prijenosa metala i CMT prijenos [1] .....	11
Slika 8 Sustav za robotsko CMT zavarivanje [10].....	12
Slika 9 Robotski sustav za CMT zavarivanje, Fronius [10].....	13
Slika 10 Međuspremnik žice. S otvorenim poklopcem (lijevo) i zatvorenim poklopcem (desno) [1] .....	14
Slika 11 Pištolj za zavarivanje CMT postupkom [1] .....	14
Slika 12 CMT lemljenje pocinčanog lima, 1mm debljine. Brzina lemljenja 1,5m/min [1].....	15
Slika 13 Sučeljeni spoj dvaju aluminijskih limova debljine 0,8mm. Zavarivanje bez podloge. Brzina zavarivanja 1,5m/min [1].....	16
Slika 14 Spoj pocinčanog lima i aluminijskih limova, oba debljine 1mm. Brzina zavarivanja 70cm/min [1] .....	17
Slika 15 Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [16] .....	25
Slika 16 Raspršivanje cinka, jedan od postupaka nanošenja cinkove prevlake na površinu čelika [16].....	27
Slika 17 Prevlaka cinka dobivena raspršivanjem cinka [11].....	28
Slika 18 Most Menai Straits [17] .....	29
Slika 19 Dalekovod kao tipični primjer pocinčanog čelika [18].....	29
Slika 20 Preklopni spoj .....	31
Slika 21 Robotska stanica Almaga OTC AX V6 .....	32
Slika 22 Fronius TPS 400i .....	33
Slika 23 Sustav za dobavu žice .....	34
Slika 24 Privjesak za učenje, "teach pendant" .....	34
Slika 25 Specifikacija dodatnog materijala [21] .....	36
Slika 26 Boca sa zaštitnim plinom .....	37
Slika 27 Elcometer 456, uređaj za mjerenje debljine sloja zaštitne prevlake .....	39
Slika 28 Limovi spremni za zavarivanje .....	40
Slika 29 Uzorak 1 – lice .....	41
Slika 30 Uzorak 2 – lice .....	42
Slika 31 Uzorak 3 – lice .....	42
Slika 32 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 1.....	43
Slika 33 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 2.....	44
Slika 34 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 3.....	44
Slika 35 Debljina zaštitnog sloja cinka, gledano pod mikroskopom - uzorak 2 .....	45
Slika 36 Debljina zaštitnog sloja cinka, gledano pod mikroskopom - uzorak 3 .....	45

Slika 37 Naličje zavara uzorka 1 .....	46
Slika 38 Naličje zavara uzorka 2 .....	46
Slika 39 Naličje zavara uzorka 3 .....	47

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Metode nanošenja cinka [11] .....	23
Tablica 2 Uobičajene temperature za vruće pocinčavanje [16] .....	24
Tablica 3 Kemijski sastav čelika S355 [19] .....	35
Tablica 4 Mehanička svojstva čelika S355 [19].....	35
Tablica 5 Debljine sloja cinka na limovima korištenim u eksperimentu .....	38
Tablica 6 Rezultati mjerenja debljine sloja cinka na limovima korištenim u eksperimentu....	39
Tablica 7 Početni parametri zavarivanja .....	40
Tablica 8 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 5 i 8 $\mu$ m - uzorak 1	41
Tablica 9 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 10 i 15 $\mu$ m - uzorak 2 .....	41
Tablica 10 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 15 i 20 $\mu$ m - uzorak 3.....	42
Tablica 11 Širina sloja bez cinka u blizini zavara na pojedinom uzorku .....	46

## SAŽETAK

Završni rad podijeljen je na dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

U teorijskom dijelu rada opisan je i analiziran CMT - Cold Metal Transfer prijenos metala u električnom luku. Opisan je princip rada CMT postupka, navedene su karakteristike i prednosti CMT postupka, glavna područja primjene postupka, te ograničenja primjene. Navedena je i oprema koja se koristi pri zavarivanju ovim postupkom. Dan je kratki opis svojstava cinka kao tehničkog materijala i nabrojane su prednosti zaštite od korozije pocinčavanjem. Navedeni su najčešći postupci pocinčavanja i ukratko opisani. Ukratko je opisana i procedura pripreme materijala za pocinčavanje.

U eksperimentalnom dijelu rada CMT postupkom su zavarena tri para pocinčanih limova, sa različitim debljinama cinkove prevlake. Opisan je sami tijek eksperimenta, navedeni su tehnički i tehnološki podaci o radnim komadima i samom postupku zavarivanja. Nakon zavarivanja, svaki od 3 zavarena uzorka je rezan na pili kako bi dobili makroizbruske, da bismo potom utvrdili koliki je utjecaj na zaštitni sloj cinka uslijed zavarivanja.

Ključne riječi: CMT zavarivanje, pocinčani limovi, unos topline

## **SUMMARY**

The thesis consists of two parts, the theoretical and the experimental part.

In the theoretical part of the thesis, the CMT – Cold Metal Transfer is described and analyzed. The work principle of the CMT process, the characteristics and advantages of the process are described. Main areas of application and limits of the process are also stated. Furthermore, the welding-system used for the CMT process is described. A brief description of the material zinc and its technical properties is given, with the advantages of using galvanization to protect steel sheets. Most common procedures of galvanization are listed and described, as well as the preparation procedure for the sheets to be galvanized.

In the experimental part of the thesis, three pairs of galvanized steel sheets, all with different coating thicknesses, are welded using the CMT process. The course of the experiment is described, technical and technological data about the work piece and the process itself are stated. After the welding process, each of the three welded samples was cut using a saw in order to get macrographs of the welded and etched samples, so we could determine how much of an influence the welding process had on the zinc coating.

Key words: CMT welding, galvanized steel sheets, heat input

## 1. UVOD

CMT je kratica za Cold Metal Transfer, što u prijevodu znači „hladni prijenos metala“. Predstavlja inačicu MIG/MAG postupka zavarivanja pri kojoj je unos topline manji u odnosu na konvencionalne postupke koji koriste prijenos metala kratkim spojevima. Postupak se temelji na oscilatornom gibanju žice, i prvi je postupak kod kojeg se namjerno koristilo povratno gibanje žice.

CMT postupak razvijen je i patentiran od tvrtke Fronius. Još 1991. Fronius je počeo s istraživanjem u području zavarivanja čelika sa aluminijem, što je moglo biti postignuto CMT postupkom zbog niskog unosa topline [1].

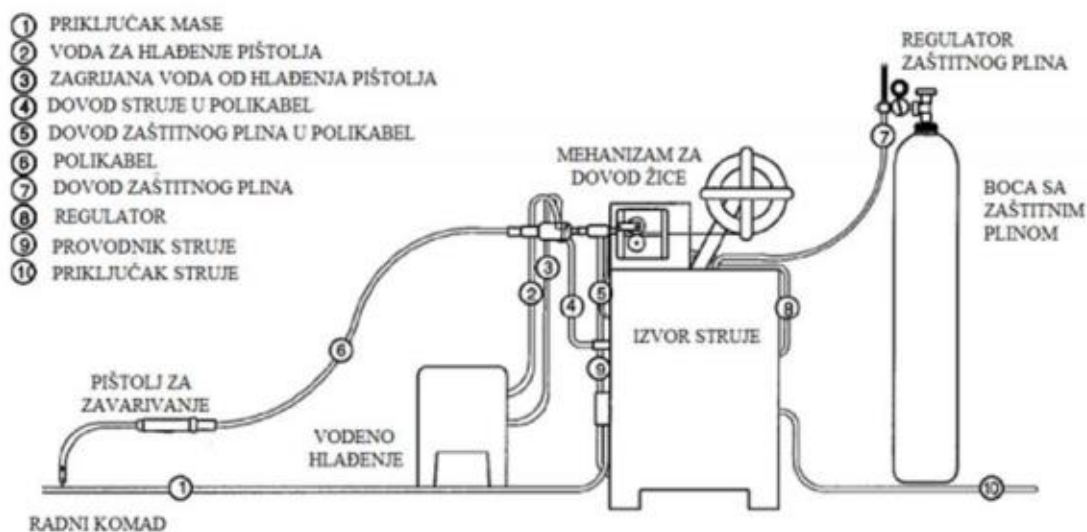
Primjena postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanje tankih limova (Al, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima. Ovaj potonji je interesantan jer integrira zavarivanje (na strani aluminija) i tvrdo lemljenje (na strani pocinčanog lima). CMT također odlikuje dobra mogućnost premošćivanja zazora pri spajanju materijala [2].

## 2. MIG/MAG ZAVARIVANJE

MIG/MAG je postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk održava između taljive elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na plus pol istosmjernog izvora struje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni (Ar ili He) ili aktivni (CO<sub>2</sub> i mješavine) plinovi. Ovisno o vrsti upotrijebljenog plina postupak nosi oznaku MIG (zaštita inertnim plinom) ili MAG (zaštita aktivnim plinom). To je poluautomatski ili automatski postupak zavarivanja pri kojem pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Taljenjem žice kao dodatnog materijala popunjava se pripremljeni žlijeb. Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Ionizacijom plina osigurava se vodljivi prostor za održavanje električnog luka [3].

Oprema za MAG postupak zavarivanja (slika 1):

- izvor istosmjerne struje
- polikabel
- uređaj za hlađenje
- dodavač žice
- boca sa zaštitnim plinom
- pištolj za zavarivanje
- regulator protoka zaštitnog plina



Slika 1 Oprema za MAG zavarivanje [4]

Prema karakteristikama električnog luka razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa metala: kratkim spojevima, štrcajućim lukom, mješovitim lukom i impulsnim lukom. Prijenos metala kratkim spojevima vrši se uz male struje zavarivanja i mali napon električnog luka. Time se ostvaruje mala količina rastaljenog metala, pa je takav način zavarivanja podesan za zavarivanje tankih limova, zavarivanje korijenskog sloja i zavarivanje u prisilnim položajima. Prijenos štrcajućim lukom ostvaruje se uz jake struje zavarivanja i velike napone električnog luka. Time se ostvaruje velika penetracija, veliki unos topline, što je pogodno za zavarivanje predmeta velike debljine, ali samo u položenom položaju [3].

## 2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Kod postupaka zavarivanja žičanim elektrodama u zaštitnoj atmosferi plinova jedan od karakterističnih načina prijenosa je prijenos kratkim spojevima. Primjenjuje se na tanke materijale, sa jačinom struje u rasponu 30-170A i napona 13-21V, pri zavarivanju žicom promjera 1,2mm [5].

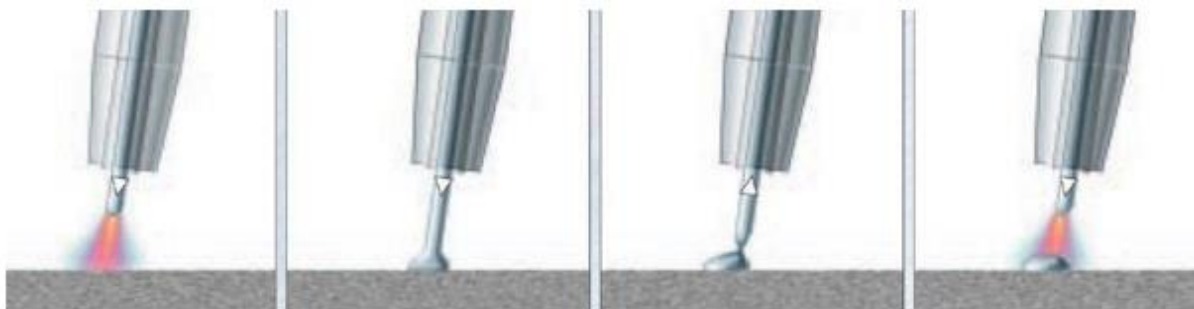


Žica se kontinuirano dobavlja prema radnom komadu, i u trenutku kada ga dotakne u električnom krugu nastaje kratki spoj. Zbog kratkog spoja napon trenutačno pada na nulu, a struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta ograničena je induktivnim otporima kruga. Obzirom da u strujnom krugu otpor ipak ima konačnu vrijednost, napon polagano raste zbog povećanja otpora. Do povećanja otpora dolazi zbog toga što povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja slobodnog kraja žice (efekt  $Q=I^2R$ ). S porastom struje povećava se i „pinch effect“. On dovodi do smanjenja presjeka žice (izazivajući povećani otpor i jače zagrijavanje) i konačno do otkidanja zagrijanog vrha žice. Time se kratki spoj prekida i električni luk se ponovo uspostavlja, a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je, opet zbog induktiviteta krugova nešto veći od nominalnog i u toku vremena se smanjuje na nominalnu vrijednost. Treba imati u vidu da se sve ovo zbiva dok se žičana elektroda jednolikom brzinom kreće prema radnom komadu. Dakle, kada žica ponovo premosti razmak nastao otkidanjem njenog vrha, ponavlja se ciklus od početka. Broj ovakvih ciklusa u jednoj sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i nametnutih parametara. Pri stabilnim parametrima obično ima i do 200 kratkih spojeva u sekundi [3].

Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od zavarivanja tankih i debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Izrazito je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Prijenos kratkim spojevima se lako zvučno prepoznaje po karakterističnom pucketanju ako se radi s pravilnim parametrima. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učin taljenja, ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [6].

### 3. CMT – COLD METAL TRANSFER

CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. povratno gibanje žice. Karakteristično je da se odvajanje kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. U ovom slučaju povratno gibanje žice kompenzira nedostatak plinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice, a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice najčešće je između 60 i 80 Hz što zahtijeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnik žice tzv. „wire-buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom [7].



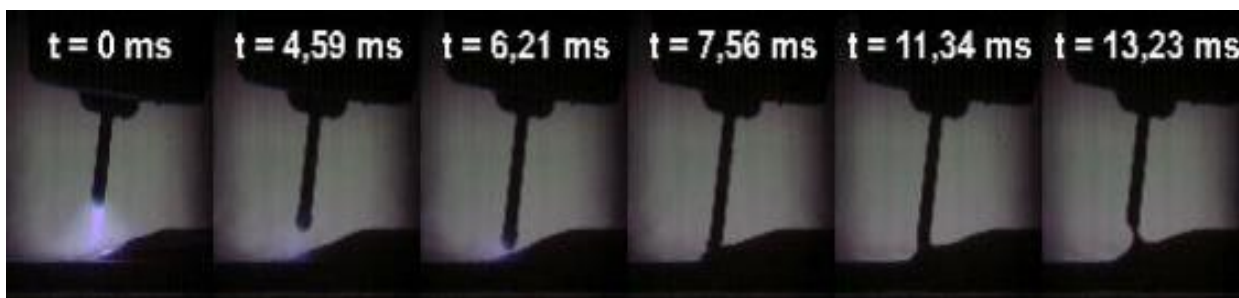
Slika 2 Shematski prikaz povratnog gibanja žice [1]

#### 3.1. Princip rada CMT zavarivanja

CMT je kratica za Cold Metal Transfer, odnosno „hladni prijenos metala“. To je zapravo MIG/MAG postupak zavarivanja uz manji unos topline od konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja. Upravo radi te karakteristike u nazivu se javlja riječ „Cold“ (hladan). Prijenos metala pri CMT postupku odvija se kratkim spojevima sa novom metodom odvajanja kapljica rastaljene žice na radni komad.

Pri konvencionalnom MIG/MAG zavarivanju žica se giba kontinuirano prema radnom komadu dok ga ne dotakne, pri čemu nastaje kratki spoj. U trenutku nastanka kratkog spoja struja raste velikom brzinom, zagrijavajući time slobodni kraj žice i povećavajući elektromagnetsku silu, uslijed čega se kapljica otkida te ponovno uspostavlja električni luk. Nakon ponovnog uspostavljanja električnog luka, žica se ponovno primiče radnom komadu čime započinje novi ciklus. Velika struja koja se javlja pri svakom kratkom spoju rezultira relativno velikim unosom topline. Također, kratki spojevi se javljaju nekontrolirano što uzrokuje puno prskanja pri konvencionalnom MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima.

Značajna razlika CMT postupka u odnosu na konvencionalni MIG/MAG je što se žica ne giba samo kontinuirano prema radnom komadu, nego se i odmiče od radnog komada frekvencijom od prosječno 70 Hz, kao što je prikazano na slici 3.



**Slika 3 Prikaz povratnog hoda žice pri CMT zavarivanju [1]**

Tri su glavne značajke po kojima se CMT razlikuje od konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja:

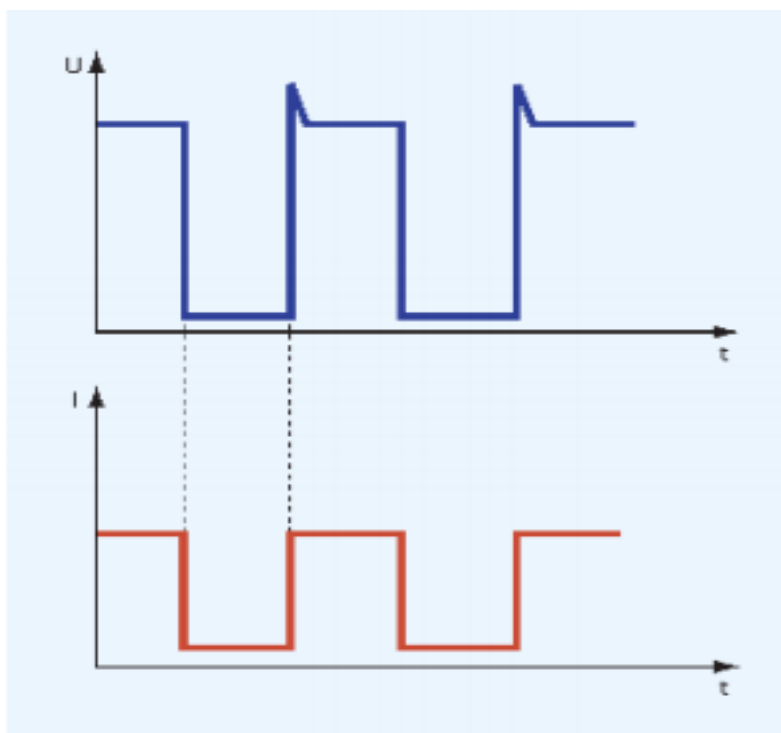
Prvo, gibanje žice izravno sudjeluje u kontroli procesa zavarivanja. Prije razvoja CMT-a, brzina dobave žice za vrijeme zavarivanja je bila prethodno namještena, odnosno točno predodređena. Kod CMT-a se žica giba prema radnom komadu dok ne dođe do kratkog spoja, a u tom trenutku žica mijenja smjer gibanja, odmiče se od radnog komada. Kada se prekine kratki spoj, smjer gibanja žice se opet mijenja, žica se opet giba prema radnom komadu i proces se ponavlja. Nema predodređenog gibanja žice, nego pojava i prekid kratkih spojeva određuje brzinu i smjer gibanja žice.

To je razlog zašto se govori o prosječnoj oscilacijskoj frekvenciji žice: kada do kratkog spoja dođe malo ranije, odmicanje žice od radnog komada će također nastupiti malo ranije. Kada se

kratki spoj javi kasnije, odmicanje žice će isto tako započeti malo kasnije. Iz tog razloga frekvencija povratnog gibanja žice varira, a prosjek je oko 70 Hz.

Druga važna značajka koja karakterizira CMT proces jest činjenica da se sami prijenos metala odvija pri vrlo niskim strujama, dok se kod konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja kratkim spojevima javljaju visoke struje za vrijeme kratkih spojeva. Kod CMT-a struja više nije odgovorna za otkidanje kapljice i ponovno uspostavljanje električnog luka. Taj nedostatak konvencionalnih postupaka je riješen upravo povratnim hodom žice. Odmicanje žice od radnog komada potpomaže prijenosu metala uslijed površinske napetosti taline. Zbog toga struja kratkog spoja može biti niska, čime se smanjuje unos topline, što je konačno i treća razlika CMT-a u odnosu na konvencionalne postupke [1].

Na slici 4 dan je dijagramski prikaz promjena struje i napona u vremenu tijekom CMT postupka zavarivanja.



**Slika 4 Promjene napona (gore) i struje (dolje) u vremenu za vrijeme CMT zavarivanja [1]**

### 3.2. Prednosti CMT zavarivanja

Kod konvencionalnih postupaka zavarivanja kratkim spojevima javljaju se velike struje za vrijeme kratkih spojeva kako bi se omogućilo otkidanje kapljice i ponovno uspostavljanje električnog luka. Kratki spoj se pri tome prekida nekontrolirano i uslijed toga dolazi do prskanja tipičnog za prijenos metala kratkim spojevima.

Pri CMT procesu struja kratkog spoja se može držati vrlo nisko. Uz to, kratki spoj se ne prekida nekontrolirano, nego se odvija u kontroliranim uvjetima što je omogućeno povratnim hodom žice. Te dvije činjenice rezultiraju zavarenim i zalemljenim spojevima praktički bez pojave prskanja. Kada se radi s uobičajenim kutovima nagiba pištolja mogu se postići zavareni spojevi bez pojave prskanja, jedino kod ekstremnih kutova javlja se prskanje. Te prskotine su posljedica samih događanja u prostoru između vrha žice i radnog komada, a ne postupka zavarivanja. S obzirom da je CMT proces praktički bez prskanja, njegovom primjenom moguće je izbjeći skupu i dugotrajnu naknadnu obradu površine nakon zavarivanja.

Sljedeća bitna prednost CMT-a je mogućnost točnog i kontroliranog upravljanja duljinom električnog luka. Kod konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja napon utječe na duljinu električnog luka. Ali napon električnog luka nije samo funkcija duljine luka, nego varira za različita stanja površine radnog komada (prisutnost oksida, masnoća...). Stoga nekad nije moguće kontrolirati duljinu električnog luka samo mjerenjem napona, odnosno moguće je pogriješiti zbog nepoznavanja stanja površine radnog komada.

Pri CMT-u žica se giba prema radnom komadu dok ne dođe do kratkog spoja, što odgovara duljini luka jednakoj nuli. Nakon toga žica se vraća u suprotnom smjeru određenom brzinom neko određeno vrijeme. Iz toga se da zaključiti da je duljina luka izravan produkt brzine i vremena. Pri CMT-u duljina električnog luka nije kontrolirana preko napona nego mehanički namještena nakon svakog kratkog spoja. Ako je prosječna frekvencija povratnog hoda žice 70 Hz, onda se isto tako duljina električnog luka namješta 70 puta u sekundi. Čak i promjenom slobodnog kraja žice duljina luka je i dalje konstantna. Isto tako, duljina luka ne mijenja se za različite brzine zavarivanja, što je uobičajeno kod konvencionalnih postupaka.

Treća bitna značajka CMT-a u odnosu na konvencionalne postupke je premostivost velikih žlijebova. Problem kod tankih limova i velikih žlijebova kod konvencionalnih postupaka je

relativno visok unos topline. Pri tome se tanki limovi istope prije nego se stigne popuniti žlijeb [1].

### 3.3. Unos topline kod CMT-a i kombinacije

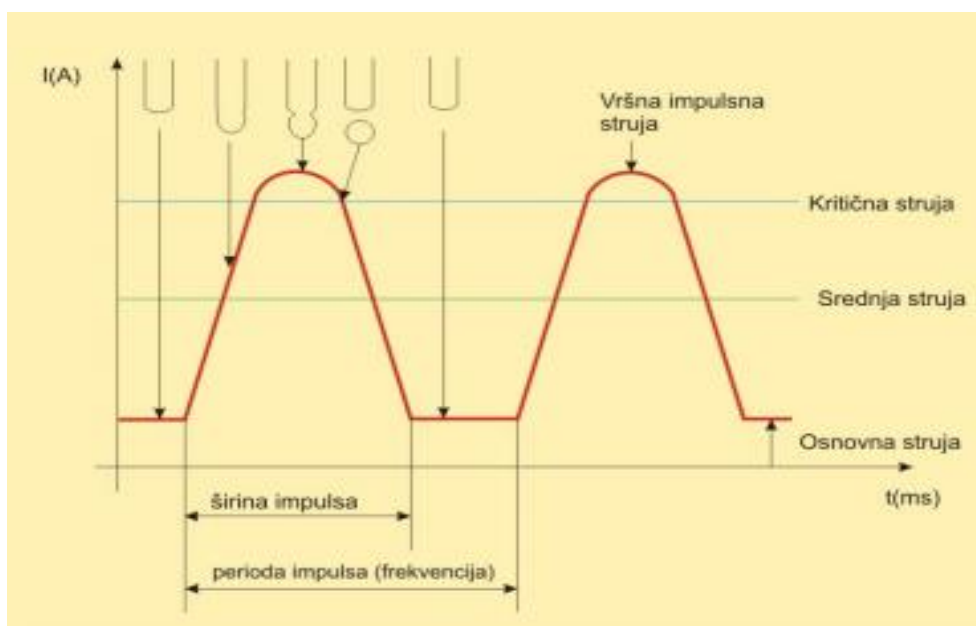
Klasični CMT karakteriziran je vrlo niskim strujama kratkog spoja. Iz toga proizlazi vrlo mali unos topline i velik omjer visine u odnosu na širinu spoja. U graničnim slučajevima kada se zahtjeva veći unos topline od onoga koji može ostvariti CMT proces postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju i to između ciklusa odvajanja kapljice [8].

Uz digitalno kontrolirani sustav zavarivanja kod CMT-a moguće je zavarivati CMT postupkom u kombinaciji sa impulsnim zavarivanjem.

#### 3.3.1. Prijenos metala impulsnim strujama

Prijenos metala impulsnim strujama je modificirani način prijenosa metala. To je kontrolirani prijenos štrcajućim lukom pri kojem se odvaja kapljica metala po impulsu, a najčešća primjena mu je za zavarivanje tankih limova [5].

S obzirom da se inače poželjan način prijenosa metala malim kapljicama ostvaruje tek iznad određenog kritičnog praga ( $I_{KR}$ ), razvijen je način impulsnog prijenosa metala.



Slika 5 Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [9]

Kod ovog načina, prosječna struja zavarivanja, manja od  $I_{KR}$  koja bi dala nepravilan i neprihvatljiv prijenos u grubim kapima, modulira se jačom strujom određene frekvencije, tako da struja varira između neke minimalne vrijednosti nazvane osnovna struja i maksimalne nazvane strujom impulsa, slika 5.

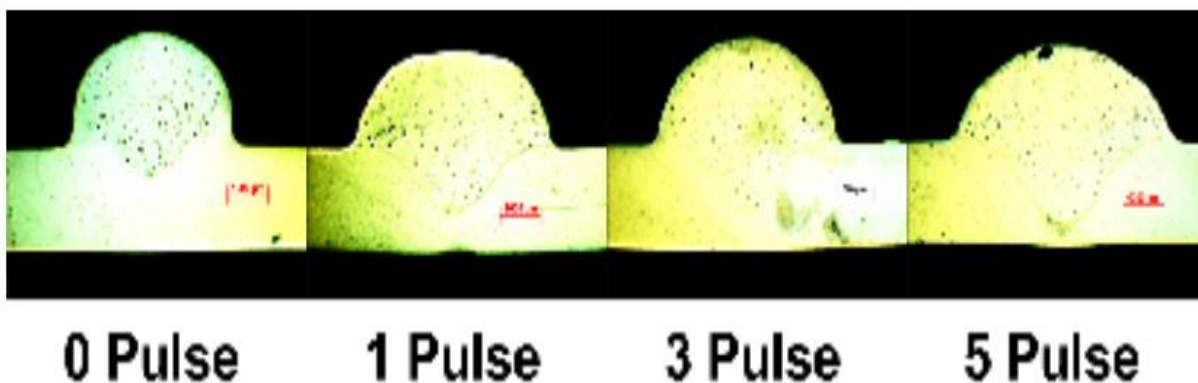
Pri tome osnovna struja ima zadatak da održava električni luk, dok je visina i duljina trajanja impulsa jake struje prilagođena da premaši  $I_{KR}$  i osigura odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu.

Postavljanje parametara za ovaj način zavarivanja je poprilično složeno jer treba uskladiti 5 parametara (veličina osnovne struje, veličina impulsne struje, trajanje osnovne struje, trajanje impulsne struje, brzina dodavanja žice). Izbor podesnih parametara danas vrše elektronički programirani uređaji koji za jednu izabranu vodeću veličinu biraju optimalnu kombinaciju ostalih parametara, sinergijski uređaji.

Impulsni način prijenosa zadržava prednosti, a otklanja poteškoće koje ima štrcajući luk, to jest moguće je primijeniti ga u svim položajima, te za materijale osjetljive na količinu unesene topline [3].

### 3.3.2. CMT zavarivanje u kombinaciji s impulsnim načinom prijenosa metala

Kao što je već navedeno, CMT se može provoditi u kombinaciji s impulsnim zavarivanjem. Može na primjer biti ubačen jedan ili tri impulsa između ciklusa CMT-a. Time se unos topline i penetracija povećavaju, i mijenja se geometrija spoja. Slika 6 prikazuje promjene u penetraciji i geometriji spoja za različite kombinacije CMT-a sa impulsnim zavarivanjem.



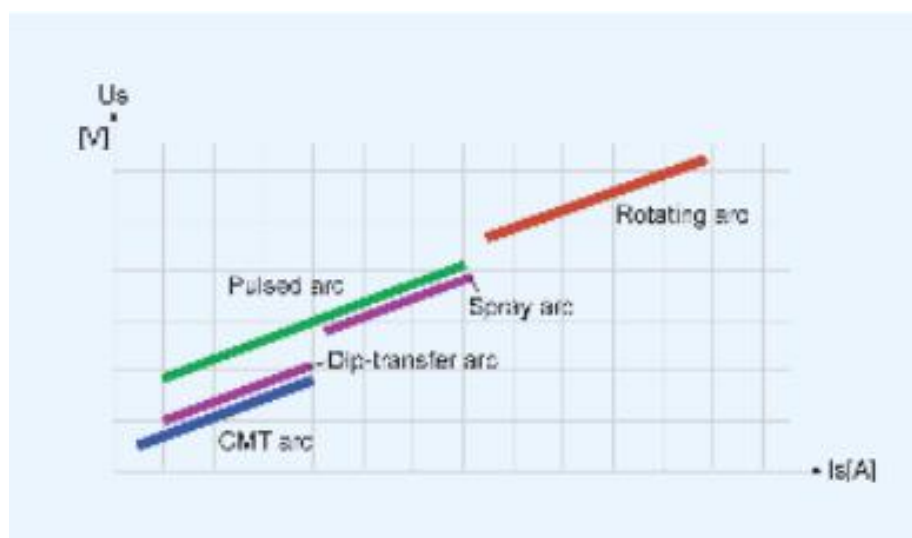
Slika 6 Promjene u penetraciji i geometriji spoja za različite omjere CMT ciklusa i strujnih impulsa. Broj impulsa između dvaju CMT ciklusa se mijenja [1]

Pri izmjeničnom provođenju 10 impulsa između dvaju ciklusa CMT-a, unos topline i penetracija su gotovo isti kao što bi bili da se koristi čisto impulsno zavarivanje bez povremenih CMT ciklusa; ali prisustvom CMT ciklusa i dalje se zadržava bitna prednost u točnom mehaničkom namještanju duljine električnog luka svakih 10 impulsa.

Kombinacije CMT-a s impulsnim zavarivanjem isto tako podupiru veliku mogućnost premošćivanja zazora specifičnu za CMT, i isto tako poboljšana je brzina zavarivanja [1].

### 3.4. Ograničenja primjene CMT-a

Kao i svaki drugi postupak zavarivanja, CMT ima svoja ograničenja. Slika 7 prikazuje područje primjenjivosti čistog CMT-a (bez dodavanja strujnih impulsa) u dijagramu napon-struja:



**Slika 7** Dijagram napon-struja koji obuhvaća klasične načine prijenosa metala i CMT prijenos [1]

Gornja granica CMT-a nalazi se tamo gdje počinje pojava prijelaznog luka, jer CMT je moguće provoditi isključivo kratkim spojevima. Pri većim strujama pri kojima prestaje prijenos metala kratkim spojevima CMT se više ne može provoditi, i to se može shvatiti kao nedostatak CMT postupka. Donja granica je niža u odnosu na konvencionalni prijenos metala kratkim spojevima, što znači da se razvojem CMT-a proširio raspon zavarivanja [1].

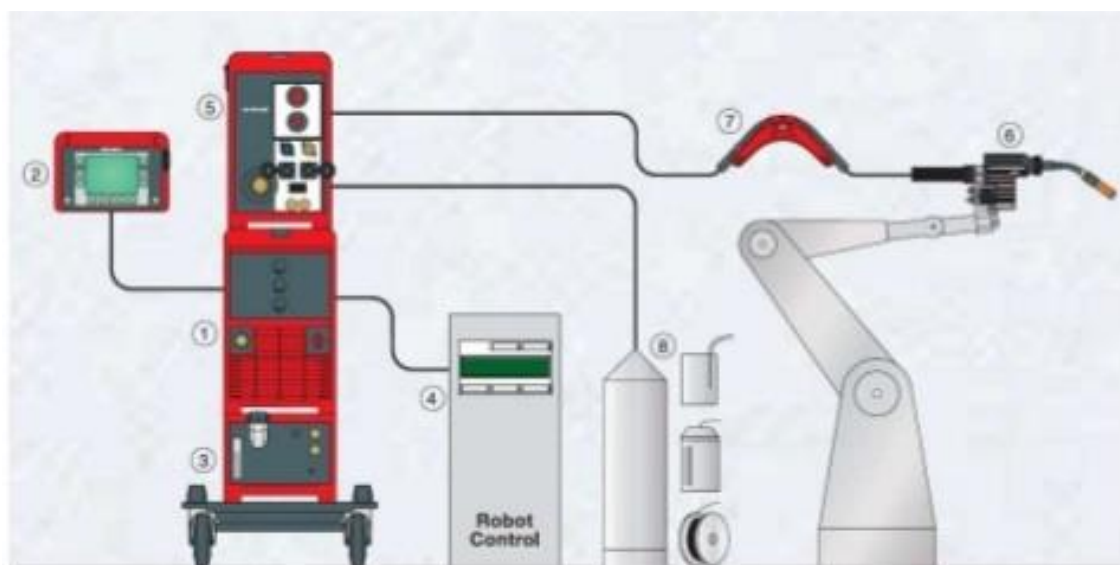
Iz dijagrama se isto tako može jasno vidjeti da je snaga, a samim time i unesena toplina pri CMT zavarivanju manja u usporedbi s konvencionalnim postupcima.



### 3.5. Sustav za CMT zavarivanje

Sustav za CMT zavarivanje je potpuno digitalno kontroliran, što uključuje mogućnost jako brze komunikacije između komponenti sustava. To je vrlo bitno za CMT jer izvor struje mora brzo znati što se događa u talini da bi mogao trenutačno reagirati.

Slika 8 prikazuje shematski prikaz sustava za robotsko CMT zavarivanje:



**Slika 8 Sustav za robotsko CMT zavarivanje [10]**

Na slici su vidljivi dijelovi sustava označeni brojevima:

- 1) Izvor struje
- 2) Jedinica za daljinsko upravljanje
- 3) Jedinica za hlađenje
- 4) Robotsko sučelje
- 5) Dobavljač žice
- 6) Pištolj za zavarivanje
- 7) Međuspremnik žice, „wire-buffer“
- 8) Spremnik žice

CMT je ustvari inačica MIG/MAG zavarivanja, čija oprema je opisana u poglavlju 2. Stoga će u ovom poglavlju biti samo opisana oprema koja čini razliku između CMT-a i konvencionalnog MIG/MAG postupka. To su međuspremnik žice, tzv. „wire-buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom, i pištolj za zavarivanje koji ima ugrađen dodatni servomotor.

Na slici 9 je prikazan jedan takav sustav tvrtke Fronius.



**Slika 9 Robotski sustav za CMT zavarivanje, Fronius [10]**

Žica se ne giba kontinuirano prema radnom komadu, nego ima i povratni hod. Iz tog razloga, dodatni motor u pištolju za zavarivanje se isto tako mora gibati naprijed i nazad. Motor koji dobavlja žicu kroz polikabel samo se giba naprijed, i ne može se ostvariti gibanje žice u suprotnom smjeru. Stoga, dodatni servomotor u pištolju za zavarivanje u određenim trenucima vraća žicu natrag dok mu se motor za dobavu žice istovremeno suprotstavlja. Dakle, potrebno je ugraditi međuspremnik žice, odnosno „wire-buffer“, između ovih dvaju motora, kako bi pohranjivao žicu. Nadalje, motor u pištolju za zavarivanje može se gibati nazad frekvencijom od najviše 70 Hz. Međuspremnik žice pomaže motoru u pištolju za zavarivanje da žica dođe do njega kroz polikabel bez primjene sile.

Međuspremnik žice, „wire-buffer“, prikazan je na slici 10, a vidljiv je i na prethodne dvije slike kao jedan od osnovnih dijelova sustava za CMT zavarivanje.



**Slika 10** Međuspremnik žice. S otvorenim poklopcem (lijevo) i zatvorenim poklopcem (desno) [1]

Unutarnja obloga u međuspremniku je samo fiksirana s jedne strane i može se gibati do drugog kraja. Dakle, unutarnja obloga može mijenjati poziciju od donjeg ruba, što odgovara praznom međuspremniku, do gornjeg ruba, što odgovara punom međuspremniku. Gibanje motora za dobavu žice je namješteno na način da je međuspremnik uvijek napola pun. Time je postignuto da dodatni servomotor u pištolju za zavarivanje može vući žicu gotovo bez primjene sile, ali isto tako može „gurati“ žicu natrag čak i kada se ona giba naprijed pokretana motorom za dobavu žice radnom komadu.

Još jedna bitna komponenta sustava za CMT zavarivanje je sami pištolj za zavarivanje. Pištolj za CMT je prava revolucija kada se govori o opremi za zavarivanje, kako u veličini, tako i u masi i funkciji. Pištolj za zavarivanje CMT postupkom prikazan je na slici 11.



**Slika 11** Pištolj za zavarivanje CMT postupkom [1]

Motor u pištolju za zavarivanje je AC-servomotor, koji je opremljen bez zupčanika, jer bi se zupčanik prebrzo pokvario pri mijenjanju smjera gibanja frekvencijom od 70 Hz.

Kako su namotaji motora direktno uključeni u kućište pištolja, veličina pištolja može biti ekstremno mala. Gibanje žice u pištolju može biti izvedeno jako precizno jer je rotacija motora kontrolirana digitalno [1].

### 3.6. Primjena CMT-a

Tri su osnovna područja primjene CMT-a:

- MIG tvrdo lemljenje bez prskanja
- zavarivanje tankih limova (Al, nelegirani čelik, nehrđajući čelik)
- spajanje aluminija i pocinčanog lima

Svi poznati osnovni i dodatni materijali za primjenu kod konvencionalnog MIG/MAG-a mogu se koristiti i za CMT. Isto tako, sve geometrije spojeva i nagibe pištolja korištene kod MIG/MAG-a moguće je koristiti i za CMT.

MIG tvrdo lemljenje je već poznato duže vrijeme. Glavna prednost MIG tvrdog lemljenja galvaniziranih limova je činjenica da se samo dodatni materijal tali, a osnovni materijal ostaje krut. Konvencionalni postupak MIG tvrdog lemljenja je karakterizirano neznatnim prskanjem, ali s vremena na vrijeme moguća je pojava pokoje prskotine. Prskanje zahtjeva naknadnu obradu površine nakon lemljenja, pa se nastoji izbjeći ako je moguće.

Kod CMT-a kratki spoj se javlja u kontroliranim uvjetima i povratni hod žice podupire prijenos metala, kao što je već ranije opisano. Kada se radi sa tipičnim nagibom pištolja CMT procesom se može postići spoj bez pojave prskanja, kao što je prikazano na slici 12.



**Slika 12 CMT lemljenje pocinčanog lima, 1mm debljine. Brzina lemljenja 1,5m/min [1]**

Ukoliko je moguće postići spoj bez pojave prskanja, izbjegnuta je skupa naknadna obrada površine. Uz to, unos topline kod CMT-a je manji u usporedbi s konvencionalnim MIG tvrdim lemljenjem, što omogućava premošćivanje većih zazora.

U mnogim granama industrije, gdje se koriste tanki limovi, masa zavarenih dijelova je vrlo bitna. Npr. u automobilskoj industriji, automobili bi trebali biti lakši kako bi trošili manje goriva.

Kako CMT postupak karakterizira vrlo nizak unos topline, sada je moguće spajati npr. aluminijske limove debljine 0,3mm sučeljenim spojem bez korištenja podloge. Dakle, moguće je izbjeći troškove pripreme podloge i naknadne obrade. Slika 13 prikazuje sučeljeni spoj dvaju aluminijskih limova debljine 0,8mm.



**Slika 13 Sučeljeni spoj dvaju aluminijskih limova debljine 0,8mm. Zavarivanje bez podloge. Brzina zavarivanja 1,5m/min [1]**

Sljedeće područje primjene CMT-a je spajanje aluminija i pocinčanog lima. Postoji zahtjev u automobilskoj industriji za spajanjem tih dvaju materijala kako bi se smanjila masa određenih komponenti. Glavni problem pri spajanju pocinčanog lima s aluminijem je formiranje vrlo krhke intermetalne faze između tih dvaju materijala. Što je tanja ta intermetalna faza, bolja su i mehanička svojstva zavarenih uzoraka. Glavni faktor koji diktira debljinu intermetalne faze je unos topline tijekom procesa spajanja. Kako bi se postigla prihvatljiva debljina te intermetalne faze potrebno je smanjiti unos topline na jako nisku vrijednost. Stoga je upravo CMT odličan postupak za spajanje pocinčanog lima s aluminijem jer je unos topline dovoljno nizak, kao što je dosad već objašnjeno u radu [1].

Slika 14 prikazuje spoj pocinčanog lima i aluminija, oba debljine 1mm, izveden CMT-om.



**Slika 14 Spoj pocinčanog lima i aluminija, oba debljine 1mm. Brzina zavarivanja 70cm/min [1]**

---

## 4. POCINČANI LIMOVI

### 4.1. Cink i njegove prevlake

Cink je meki metal niske čvrstoće koji slobodno korodira, ali sporo i relativno konstantnom brzinom. Cink je, također, dosta otporan na maziva i goriva u kojima ima spojeva dvovalentnog sumpora. Cinkove prevlake debljine 25 $\mu$ m štite čelik od hrđanja 10 do 30 godina u seoskoj, 8 do 16 godina u primorskoj i 4 do 6 godina u industrijskoj atmosferi. Razlog male brzine korozije je tendencija stvaranja cinkovih klorida i karbonata kao korozijskih produkata, koji guše napredovanje korozije [11].

Pri elektrokemijskoj koroziji cink je u pravilu podvrgnut aktivnom otapanju, koje može biti kočeno stvaranjem zaštitnog sloja cinkovog oksida, hidroksida ili karbonata. Iz ovog proizlazi dobra korozijska otpornost cinka u mnogim medijima.

Cink je na zraku prilično stabilan jer na njegovoj površini nastaje sloj oksida ili karbonata koji ga štiti od daljnje korozije. Zbog te stabilnosti cink se upotrebljava za pocinčavanje željeza pri čemu on dodatno štiti željezo od korozije katodnom zaštitom.

U destiliranoj vodi koja sadrži kisik, cink korodira uz stvaranje cinkovih hidroksida i oksida. U prirodnim vodama odlučujuću ulogu za koroziju cinka ima sastav vode, pri čemu je naročito značajan sadržaj iona  $\text{HCO}_3^-$  koji naročito jako napadaju cink. Ukoliko voda sadrži dovoljno visoku koncentraciju iona  $\text{Ca}^{2+}$  u protočnim uvjetima dolazi do stvaranja sloja cinkovog karbonata i drugih produkata na cinku koji sprječavaju daljnju koroziju [12].

Velik utjecaj na brzinu korozije cinka ima temperatura vode. Korozija cinka u vodi uz prisustvo zraka je maksimalna kod oko 65°C. Kod viših temperatura korozija opet opada budući da topljivost kisika u vodi postaje manja.

Metalni se cink uglavnom upotrebljava kao [12]:

- temeljni materijal za izradu cinkovih limova
- sastavni dio kod proizvodnje mjedi
- metalna prevlaka kod proizvodnje pocinčanih limova

Ovaj potonji je nama najzanimljiviji s obzirom na temu koju ovaj rad obrađuje.

Cink ima prilično loša mehanička svojstva i nisko talište koje iznosi 419,5 °C. Zagrijavanjem iznad 250 °C zbog pojave krhkosti mehanička svojstva se naglo dodatno pogoršavaju. Te činjenice ograničavaju primjenu cinka kao konstrukcijskog materijala, te su za tu svrhu značajnije legure cinka. Cink se najviše koristi u obliku prevlaka koje primjerice vrlo djelotvorno štite ugljični čelik od korozije u atmosferi i prirodnim vodama zbog zaštitnog djelovanja sloja korozije [13].

Odlikuju ga karakteristike relativne inertnosti prema atmosferskim uvjetima i dovoljna reaktivnost pri zaštiti čelika, što ga čini jedinstvenim. Dodatne prednosti su laka dostupnost i činjenica da je jedan od najjeftinijih obojenih metala.

Moguće je koristiti i druge metale kao prevlake na čelicima, kao što su magnezij, aluminij i kalcij. Ali nijedan se nije pokazao dovoljno koristan i efektivan poput cinka. U SAD-u godišnje iskoristi preko milijun tona cinka, a otprilike pola tog iznosa koristi se u obliku prevlaka za zaštitu čeličnih površina. Većina toga se koristi za galvanizaciju i elektrodepoziciju cinčanih prevlaka. U SAD-u se svake godine približno deset milijuna tona čelika zaštiti nekom vrstom cinčane prevlake [11]. Zbog relativno konstantne brzine korozije životni vijek cinkovih prevlaka je proporcionalan njihovoj debljini. Debljina sloja je ovisna o metodi nanošenja cinka.

## 4.2. Pocinčani limovi

Cink se koristi kao prevlaka za zaštitu čelika već preko 100 godina. Prevlačenje cinkom predstavlja najefektivniji i najekonomičniji način antikorozijske zaštite čelika.

Pocinčani limovi nude kombinaciju sljedećih svojstava [11]:

- Visoke čvrstoće
- Oblikovljivosti
- Male težine
- Korozijske otpornosti
- Estetike
- Niske cijene

Niti s jednim drugim materijalom se ne može postići jednako kvalitetna zaštita čelika kao što je slučaj sa cinkom. Zbog gore navedenih razloga, pocinčani čelik je idealan materijal u



graditeljstvu i raznim proizvodnim primjenama, od automobilske industrije do uređaja u domaćinstvu. Također se primjenjuje u velikim količinama u gradnji čamaca u kojoj je najzastupljenija metoda spajanja upravo zavarivanje.

Oko 4% ukupnog godišnjeg BDP-a u industrijskim zemljama svake godine otpada na koroziju. S obzirom na to, primjena pocinčanih proizvoda je u značajnom porastu u zadnjih petnaest godina. Prema podacima iz 2000. postoji preko 550 linija za kontinuirano pocinčavanje diljem svijeta, a očekuje se i porast tog broja [14].

Lim za pocinčavanje je lim od običnog ugljičnog čelika, a to znači da je vrlo osjetljiv na koroziju. On se prevlači tankim slojem cinka, koji mu daje odličnu otpornost na koroziju. Pocinčavanjem se dobiva lim koji ima veliku čvrstoću i žilavost, nisku cijenu, te dobru otpornost na korozijsko djelovanje okoline.

### 4.3. Priprema površine metala

Preduvjet za kvalitetno prevlačenje metalnog predmeta je dobra priprema njegove površine. Prije svake zaštite potrebno je s površine ukloniti nečistoće kao što su produkti korozije, okujinu, masnoće i dr. Nečistoće se uklanjaju postupcima čiji karakter i redosljed ovise o stupnju onečišćenja, vrsti prevlake i željenom izgledu proizvoda [11].

Prema normi ISO 12944-4: Vrste površina i priprema površina, opisani su različiti tipovi površina koje se zaštićuju i dane su informacije o metodama pripreme površina (mehaničko, kemijsko i toplinsko čišćenje). Norma opisuje stupnjeve kvalitete pripremljenih površina, hrapavost, kontrolu pripremljenih površina, privremenu zaštitu, pripremu površine ili djelomično zaštićenih površina prije nanošenja narednih premaza, pripremu vruće pocinčanih površina, toplinski naštrcanih površina, galvanski zaštićenih i šeradiziranih površina te drugih obojenih površina. Također daje preporuke kod onečišćenja okoliša [15].

Postupci za pripremu površine su:

- Mehanički
- Kemijski
- Elektrokemijski
- Odmašćivanje

### 4.3.1. Mehanička obrada

Ovom vrstom obrade se skidaju korozijski produkti, a primjenjuje se nekoliko tipova postupaka [12]:

- Brušenje – može biti grubo i fino, a provodi se čvrstim ili elastičnim kolutovima s abrazivom ili neprekidnom trakom s abrazivom
- Poliranje – izvodi se pastom ili prahom za poliranje i koristi se za uklanjanje zaostalih neravnina nakon brušenja
- Obrada u bubnjevima – provodi se za sitne predmete koji nisu osjetljivi na udarce uz rotiranje s abrazivom (kvarcni pijesak, korund)
- Četkanje – vrši se skidanje rahlih korozijskih produkata s površine metala četkama od metalne žice ili perlona. Pri strojnoj obradi se koriste rotirajuće četke
- Pjeskarenje – služi za uklanjanje korozijskih produkata, te stare metalne ili nemetalne prevlake, i to u struji kvarcnog pijeska ili korunda s komprimiranim zrakom. Korund je puno bolje rješenje jer ne stvara za zdravlje opasnu silikatnu prašinu koja izaziva teške bolesti dišnih organa (silikoza)
- Mlaz vode s dodacima pijeska – služi za mehaničko uklanjanje nečistoća i smanjuje prašinu u zraku
- Sačmarenje – provodi se mlazom čelične sačme pomoću specijalnih mlaznica, postupak je vrlo sličan pjeskarenju

### 4.3.2. Kemijska obrada

Kemijska obrada u otopinama kiselina ili lužina (dekapiranje) služi za uklanjanje korozijskih produkata i anorganskih onečišćenja s površine metala. Pri korištenju ovog tipa obrade uvijek postoje određeni zahtjevi kao što su brzo otapanje korozijskih produkata, niska cijena, neotrovnost, mogućnost regeneriranja, neisparljivost i što manje otapanja metala koje se sprječava dodatkom inhibitora. Kiselinsko dekapiranje se najčešće izvodi u otopinama klorovodične ili sumporne kiseline za čelike, dok se dušične kiseline koriste za bakar. Lužnato dekapiranje najčešće se izvodi u otopinama natrijevog hidroksida.

### 4.3.3. Elektrokemijska obrada

Elektrokemijska obrada sadrži dva tipa obrade, a to su elektrokemijsko nagrivanje i elektrokemijsko poliranje.

Pomoću elektrokemijskog nagrivanja uklanjaju se oksidi i drugi produkti korozije s površine metala, uronjenog u elektrolit, istosmjernom strujom. Može biti anodno ili katodno. Kod anodnog nagrivanja metal je spojen kao anoda i postižu se vrlo dobri rezultati kod predmeta koji nemaju veće izbočine ili udubljenja zbog ravnomjernije podjele gustoće struje. Kod katodnog nagrivanja metal je spojen kao katoda i nalazi se u otopini kiseline, te se na njemu razvija vodik koji mehanički odstranjuje okside s površine metala. Kod ovog tipa nagrivanja nema bojazni od otapanja metala, ali postoji opasnost od vodikove krhkosti koja se može spriječiti kombiniranjem anodnog i katodnog nagrivanja.

Elektrokemijsko poliranje je postupak u kojem ne dolazi do promjene metalne strukture zbog topline oslobođene trenjem (za razliku od mehaničkog poliranja). Dijelovi koji moraju biti podvrgnuti elektropoliranju su spojeni kao anode u elektrolitu određenog sastava i koncentracije.

### 4.3.4. Odmašćivanje

Odmašćivanje je postupak koji služi za odstranjivanje mineralnih i bioloških masnih tvari, tj. teških ugljikovodika iz nafte, odnosno triglicerida masnih kiselina iz biljki, životinja ili ljudi s površine metala i neophodno je kod pripreme površine za nanošenje prevlaka kako bi prevlaka što bolje prijanjala na metalnu površinu. Postoje četiri vrste postupka: pomoću lužnatih otopina, pomoću organskih otapala, elektrokemijsko odmašćivanje i odmašćivanje ultrazvukom [12].

#### 4.4. Postupci pocinčavanja

Postoji više metoda nanošenja cinka na čelične površine, a one su prikazane u tablici 1.

**Tablica 1 Metode nanošenja cinka [11]**

	<b>Metode nanošenja cinka na metalnu površinu</b>
<b>1.</b>	Vruće uranjanje <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vruće uranjanje poslije obrade</li> <li>• Kontinuirano linijsko</li> </ul>
<b>2.</b>	Elektrokemijsko nanošenje cinka
<b>3.</b>	Kemijsko nanošenje cinka
<b>4.</b>	Šeradiranje
<b>5.</b>	Naštrcavanje

Debljina nanesenog sloja cinka ovisi od postupka do postupka, a kreće se od nekoliko mikrometara pa do nekoliko desetaka mikrometara (6...100 $\mu$ m), a moguće su i veće debljine slojeva.

##### 4.4.1. Vruće uranjanje

Prije samog procesa uranjanja površina čelika prvo se mora očistiti od svih nečistoća i okujina i zatim se uranja u rastaljeni metal. Provodi se na način da se predmet koji je potrebno zaštititi uranja u rastaljeni metal i kratkotrajno drži u talini nekog metala. Općenito, postupak se primjenjuje za dobivanje prevlaka metalima relativno niskog tališta: cinkom (420°C), kositrom (232°C) i olovom (327°C), a danas se primjenjuje i za dobivanje aluminijskih prevlaka.

Prevlake cinka dobivene uranjanjem u talinu cinka predstavljaju najrašireniji postupak zaštite od atmosferske korozije kao i od korozije u neutralnom tlu. Ako atmosfera nije jako agresivna, prevlaka cinka može trajati i preko 50 godina. U atmosferi u prisutnosti SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> i HCl ove prevlake brzo podliježu koroziji [12].

Rastaljeni cink brzo vlaži očišćeni čelik i spaja se s njime tvoreći čvrstu vezu između cinka i površine čelika. Jedna od glavnih prednosti ovog postupka je ta da kad je objekt uronjen,

izvučen i ohlađen, proces je gotov i s galvaniziranim predmetom se može rukovati bez straha od oštećenja. Prevlake dobivene vrućim uranjanjem su hrapave i omogućuju neprobojnu i dugotrajnu barijeru protiv većine atmosferskih korozivskih procesa [11].

#### 4.4.1.1. Vruće uranjanje poslije obrade

To je jedna od prvih metoda koja se koristila za prevlačenje cinkom. Kontinuirano se koristi već godinama s malim poboljšanjima i vrlo je učinkovita. Ima vrlo širok raspon primjene od najsitnijih dijelova kao što su vijci i matice pa sve do velikih kao što su spremnici, kontejneri itd.

Struktura cinkove prevlake i njena debljina ovise o sastavu i fizikalnim uvjetima u kojima je čelik bio obrađen baš kao i o temperaturi te vremenu obrade u kupki. Ukupna debljina legirnog sloja ima težnju da bude nešto veća na rubnim površinama. Debljinu prevlake moguće je kontrolirati tako da se kontrolira vrijeme uranjanja i brzina vađenja. Kada se zahtijeva tanka prevlaka, cink se mehanički makne s površine. Tako se mali dijelovi i dijelovi s navojem često centrifugiraju nakon što su vruće uronjeni u cilju uklanjanja viška cinka. Jedan od nedostataka prevlačenja ovim postupkom je mogućnost deformacije strukture tijekom zagrijavanja u kupci. Ovaj postupak se koristi u slučajevima kada je nužno postići deblju prevlaku, jer galvanizacija u tom slučaju nije ekonomična. Sve u svemu, ovo je vrlo koristan proces, posebice za komplicirane i razmjerno lagane dijelove [16].

U tablici 2. dane su uobičajene temperature pocinčavanja postupkom vrućeg uranjanja.

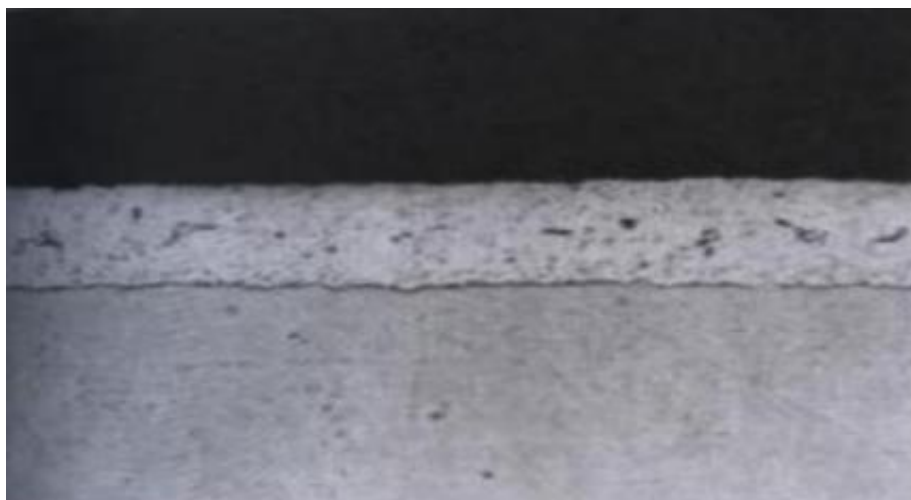
**Tablica 2 Uobičajene temperature za vruće pocinčavanje [16]**

Vrsta prevlake	Temperatura taljenja, [°C]	Temperaturni interval obrade, [°C]	Uobičajena temperatura obrade, [°C]
Cink	420	440-460	450

#### 4.4.1.2. Kontinuirano linijsko uranjanje

Kod ovog postupka, vrlo male količine aluminija dodaju se u cinčanu kupku što omogućava dobru adheziju i dovoljnu duktilnost da je moguće duboko vučenje i savijanje bez značajnijeg oštećenja same prevlake. Većina vruće uronjenih čelika koji se koriste u izradi metalnih građevina su izrađeni metodom neprekinutih traka. Cinkove prevlake dobivene ovim procesom se razlikuju od prevlaka dobivenih vrućim uranjanjem u tome što se u ovom procesu ostvaruje legiranje između čelika i cinka.

Slika 15 prikazuje mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija dobivenih galvaniziranjem, gdje se jasno vide granice između dva metala.



Slika 15 Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [16]

#### 4.4.2. Elektrokemijsko nanošenje cinka

Elektrokemijsko nanošenje cinka bitno je hladniji proces uspoređujući s toplinom koja se javlja kod vrućeg uranjanja. Većina ovih procesa su neprekidni i primjenjuju se na limove, žice, te električne kablove i slične objekte. Postupkom se ostvaruje tanki sloj čistog cinka koji ima odlična prijanjajuća svojstva. Prevlaka je glatka, bez sjajnih karakteristika. Prevlake na limu obično imaju težinu od otprilike 19 do 62 grama po kvadratnom metru. Elektrodepozicijski čelik omogućava proces primjene cinčanih prevlaka na dijelove koji ne mogu biti vruće uranjani. To je posebno korisno kod dijelova koji mogu biti oštećeni pri povišenim temperaturama [16].

#### 4.4.3. Kemijsko nanošenje cinka

Postupak kemijskog nanošenja cinkovih prevlaka vrlo je sličan elektrokemijskom nanošenju, iako nije kontinuiran i primjenjuje se kao šaržni postupak. U njemu se debljina cinkovog sloja može kontrolirati na način da se vodi računa o tome koliko je dugo predmet uronjen u kupci. Ovo je vrlo efektivna metoda nanošenja cinka na male predmete. Najčešće se koristi za predmete manjih dimenzija koji se prevrću u bubnju koji se nalazi u kupci. Kemijski cinčane prevlake su tamno sive boje. Prevlaka je od čistog cinka i homogenog je sastava.

#### 4.4.4. Šeradiranje (difuzijsko pocinčavanje)

Šeradiranje se ostvaruje procesom difuzije. Obrada difuzijom je postupak stvaranja površinskog sloja legure između metala koji se obrađuje (najčešće čelika) i drugog metala kojim se obrađuje, dugotrajnim zagrijavanjem predmeta u metalnom prahu ili atmosferi koja izdvaja taj drugi metal [12].

Šeradiranje je postupak stvaranja željezo-cink legure na čeličnim predmetima zagrijavanjem tih predmeta u smjesi cinkovog praha sa ZnO. Provodi se zbog zaštite od atmosferske korozije, korozije u slatkoj vodi i korozije u neutralnom tlu. Najveću primjenu ima za manje predmete kao što su vijci, matice, svornjaci, čavli itd.

Postupak šeradiranja sastoji se u stavljanju pripremljenih suhih predmeta u bubnjeve s prahom smjese od 90% cinka i 10% cinkovog oksida. Uz polagano okretanje sadržaj bubnja se zagrijava na temperaturu od 300-400°C u trajanju od 3-4 sata. Nakon postupnog hlađenja do sobne temperature bubanj se otvara i predmeti ispuštaju na sito [12].

Ovaj se postupak najviše koristio početkom dvadesetog stoljeća. Danas se još rijetko koristi u SAD-u.

#### 4.4.5. Raspršivanje cinka

Raspršivanje cinka je postupak gdje je cink rastaljen u pištolju i pomoću stlačenog zraka raspršen na površinu čelika, pri čemu je čelik najčešće ispjeskaren. Cink bi se trebao nanijeti

što prije nakon pripreme površine kako bi se izbjegla oksidacija čelika i osigurao efektivan spoj metal-metal. Spoj može biti narušen ili zbog oksidacije ili zbog temperature čelika u vrijeme kada je cink nanesen na njega. Na slici 16 prikazan je proces raspršivanja cinka.

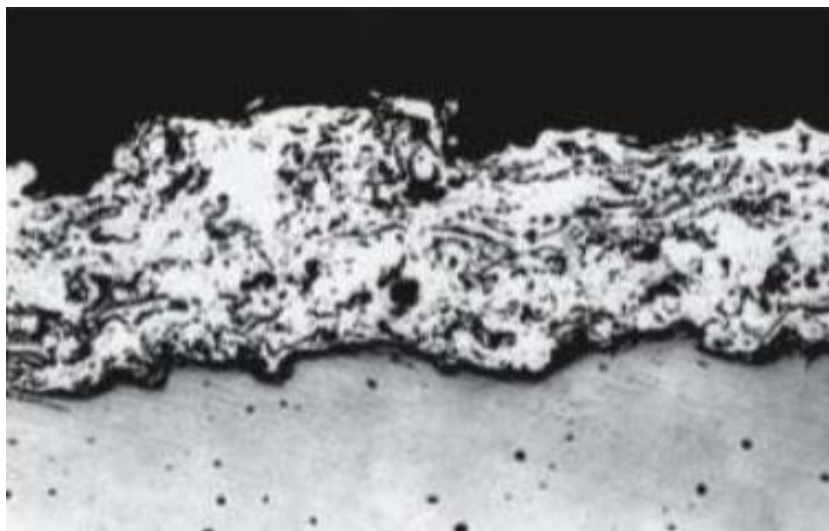


**Slika 16 Raspršivanje cinka, jedan od postupaka nanošenja cinkove prevlake na površinu čelika [16]**

Raspršivanje cinka može se provesti na dva načina. Prvi je proces u kojem se cink u obliku žice ubacuje u plamen. Struja stlačenog zraka raspršuje rastaljeni metal i odvodi ga iz mlaznice. Žica cinka dodaje se neprekidno u pištolj sve dok pištolj radi. Drugi postupak koristi cinkov prah. Usitnjeni cink je transportiran do pištolja pomoću plina i zagrijan pomoću plamena koji okružuje mlaznicu. Komprimirani zrak daje pokretačku silu pari rastaljenog cinka za udar o metal. Cink u obliku spreja može se primijeniti na konstrukcije bilo koje veličine i oblika. Prevlaka ovisi o operateru koji ju nanosi i odgovarajućoj vještini da bi se dobio gladak i ravan film na površini. Sprejanje cinka je teško ostvarivo, ako ne i nemoguće u šupljinama, uglovima i sličnim područjima [16].

Na slici 17 prikazana je mikrostruktura cinkove prevlake dobivene toplinskim naštrcavanjem cinka.





**Slika 17** Prevlaka cinka dobivena raspršivanjem cinka [11]

#### **4.5. Primjena pocinčanih limova**

Cinčane prevlake koriste se u svrhu zaštite od korozije, a područje njihove primjene je vrlo široko. Primjenjuju se na mostovima, zgradama, morskim plovilima i konstrukcijama, cjevovodima, kemijsko-obradnim opremama, elektranama, ispušnim dimnjacima, spremnicima za pohranu vode, kotlovima, za rasvjetne stupove, opremu za ceste, armature za betoniranje, u automobilskoj i brodograđevnoj industriji, željeznicama, u elektroprivredi, za poljoprivredne konstrukcije, razne ograde, čelično rešetkaste konstrukcije, za komunalnu opremu za javne gradske površine, metalne cijevi razne namjene te gotovo sve ostale čelične proizvode izložene atmosferskim utjecajima [11, 16].

Te prevlake su anodne za čelične podloge i najvažnije je da se ponašaju kao barijere. Iz tog razloga, anodne prevlake su često pokrivene ili površinski obrađene da bi spriječile razne vrste korozijskih penetracija na površinama čelika. Anodne prevlake imaju negativniji elektrodni potencijal od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje. Anodne prevlake zaštićuju temeljni metal od korozije ne samo mehanički već i elektrokemijski. Poželjno je da se te prevlake primjenjuju putem procesa koji minimizira poroznost same prevlake. Odabir debljine prevlake ovisi o uvjetima okoliša, a najčešće varira između 50 i 500 $\mu$ m [16].

Iskustva s metalnim prevlakama za infrastrukturne primjene sežu još iz 1940-ih. Zaporni zasuni koji su bili pocinčani su ostali u savršenom stanju bez ikakvog održavanja kroz nekoliko desetljeća. St. Denis Canal Lock Gates u Francuskoj, prevučen 1930. godine je izvanredan

primjer. U Velikoj Britaniji ovjesi lanaca i ostale komponente na Menai Straits mostu su bile pocinčane prije 2. svjetskog rata. Za vrijeme rata most nije bio održavan. Kada su se nakon rata radile kontrole, pocinčani dijelovi mosta bili su u odličnom stanju, a samo premazane čelične konstrukcije su zahrđale. Slika 18 prikazuje most Menai Straits.



**Slika 18 Most Menai Straits [17]**

Još jedan tipičan primjer pocinčanog čelika su dalekovodi, slika 19.



**Slika 19 Dalekovod kao tipični primjer pocinčanog čelika [18]**

Smanjena potreba za održavanjem mosta potaknula je Britance da primjene raspršivanje metalnih prevlaka na brojnim cestovnim i željezničkim mostovima u proteklih 40 godina. Toplinsko naštrcavanje omogućuje postizanje potpune zaštite od korozije bez potrebe

održavanja i preko 30 godina. Pedesetogodišnja učinkovita zaštita je zabilježena u ruralnim sredinama, dok je u industrijskim, urbanim i obalnim sredinama njihov vijek nešto više od dvadeset godina. Životni vijek prevlake od cinka, debljine 255 $\mu$ m, iznosi oko 25 godina koji bi se mogao produžiti za 15-ak godina kada bi na tu prevlaku nanijeli vinilni završni premaz. Cijena toplinski raspršenog cinka 1998. u SAD-u iznosila je 10\$ po kvadratnom metru ili 0,40\$ po kvadratnom metru za razdoblje od 25 godina [11].

---

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

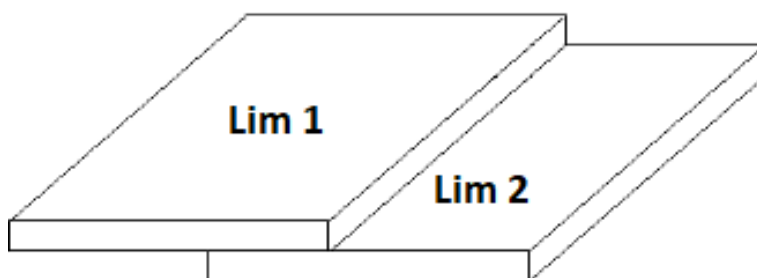
### 5.1. Opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je bilo za zavareni spoj pocinčanih limova malih debljina izveden CMT prijenosom metala ocijeniti kvalitetu zavara. Isto tako trebalo je odrediti utjecaj postupka zavarivanja na debljinu i širinu pocinčanog sloja. U konačnici, trebalo je ocijeniti primjenjivost CMT postupka za zavarivanje pocinčanih limova malih debljina, kao i eventualne preporuke u vidu poboljšanja kvalitete zavarenog spoja.

### 5.2. Priprema spoja

Odabran je preklopni spoj, prikazan na slici 20.

Rubove radnih komada nije bilo potrebno mehanički pripremati jer se radi o limovima male debljine (3mm). Prije samog procesa zavarivanja limovi su očišćeni alkoholom od eventualnih nečistoća.



Slika 20 Preklopni spoj

### 5.3. Oprema

Zavarivanje uzoraka provedeno je pomoću robotske stanice Almega OTC AX V6. Robot ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojega se izvršava on-line programiranje, što se odnosi na snimanje putanje i definiranje tehnoloških parametara za zavarivanje.

Na slici 21 prikazana je robotska stanica Almega OTC AX V6, koja se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u.



**Slika 21 Robotska stanica Almega OTC AX V6**

Dijelovi od kojih se sastoji robotska stanica su:

- 1) Robot OTC Almega AX V6
- 2) Sustav za čišćenje sapnice, rezanje žice i naštreavanje sredstava protiv naljepljivanja kapljica

- 3) Pozicioner P250V ROBO
- 4) Izvor struje robotske ruke
- 5) Upravljačka jedinica robota
- 6) Izvor struje Varstroj VPS 4000
- 7) Izvor struje TIG VARTIG 3500 DC/AC
- 8) Sustav za automatsku izmjenu pištolja
- 9) Senzor za praćenje električnog luka AX-AR
- 10) Privjesak za učenje

Uz navedene dijelove, robotska stanica ima i shock senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline.

Korišteni uređaj za CMT zavarivanje je Fronius TPS 400i. Na slici 22 je prikazan uređaj korišten za provedbu eksperimenta, a na slici 23 sustav za dobavu žice.

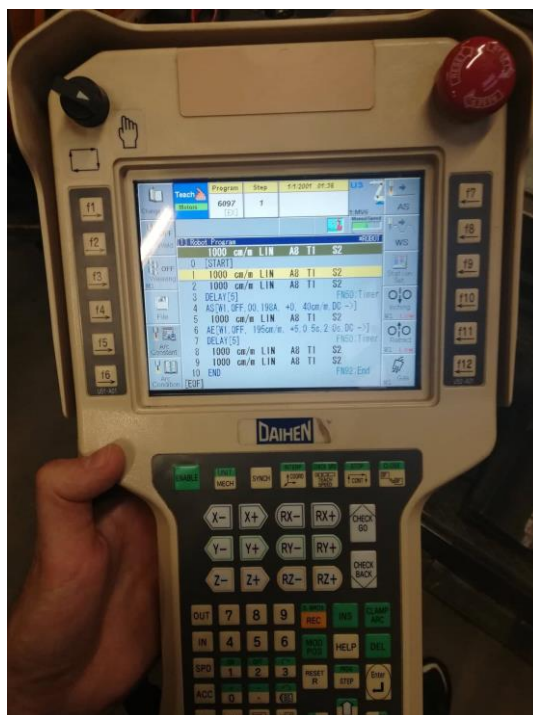


**Slika 22 Fronius TPS 400i**



Slika 23 Sustav za dobavu žice

Sami proces zavarivanja je automatski i potpuno mehaniziran. Zavarivanje provodi robotska ruka kojom se upravlja preko tzv. „teach-pendanta“, odnosno privjeska za učenje, slika 24.



Slika 24 Privjesak za učenje, "teach pendant"

### 5.3.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je opći konstrukcijski čelik S355 (HRN EN 10025-2).

U tablici 3 prikazan je kemijski sastav (maksimalne vrijednosti) osnovnog materijala, a u tablici 4 njegova mehanička svojstva.

**Tablica 3 Kemijski sastav čelika S355 [19]**

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si
Maseni udio elementa, %	0,23	1,6	0,05	0,05	0,05

**Tablica 4 Mehanička svojstva čelika S355 [19]**

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezljivost, %
470-630	355	22

Pocinčani limovi korišteni u eksperimentalnom dijelu ovog rada su debljine 3mm, dužine 300mm, a širine 150mm.

### 5.3.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za zavarivanje korištena je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ – MIG CuSi3 promjera 1mm. Na sljedećoj stranici slikom 25 prikazana je specifikacija dodatnog materijala koji je korišten za provedbu eksperimentalnog dijela rada.



<b>NORME</b>			
HRN EN ISO 24373	AWS / ASME SFA-5.7	DIN 1733	W. Nr.
S Cu 6560 (CuSi3Mn1)	ERCuSi-A	SG-CuSi3	2.1461

<b>SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE</b>			
Silicijem legirana bakrena žica za zavarivanje bakra, niskolegiranog bakra i bakar-cink legura, te za njihovo spajanje s čelikom. Koristi se i za MIG lemljenje pocinčanih limova te za platanje sivog lijeva, nelegiranih i niskolegiranih čelika. Zavar je otporan na povišene temperature i koroziju.			

<b>MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA</b>			
R <sub>eL</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> %	KV (20°C) J
> 120	330 - 370	> 40	≥ 60

<b>ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE</b>				
	Cu	Mn	Si	Sn
%	bal.	0,75 - 0,95	2,80 - 2,95	≤ 0,1

<b>ZAŠTITNI PLIN</b>	
I1 (Ar)	

<b>PAKIRANJE</b>	
Promjer žice mm	Namotaj
0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Žica do žice (S-S)
15 kg - plastični ili žičani kolut	

= +

Slika 25 Specifikacija dodatnog materijala [21]

### 5.3.3. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin za provedbu pokusa korišten je 100%-tni argon, prema normi HRN EN ISO 14175. Slika 26 prikazuje bocu sa zaštitnim plinom.



Slika 26 Boca sa zaštitnim plinom

#### 5.4. Tehnološki i tehnički podaci o radnim komadima i postupku zavarivanja

Prije provedbe eksperimenta određeni su tehnološki i tehnički parametri. Uzeta su 3 para limova iste debljine (3mm) sa različitim debljinama zaštitne cinkove prevlake. Određene su dimenzije limova, definirana je tehnika rada, zaštitni plin, vrsta i promjer dodatnog materijala itd.

Materijal: S355, pocinčani lim

Debljina lima: 3mm

Dimenzije uzorka (dužina x širina): 300 x 150mm

Tip spoja: preklopni

Položaj zavarivanja: horizontalni položaj

Zaštitni plin: 100% argon

Protok zaštitnog plina: 16 l/min

Vrsta žice: CuSi3

Promjer žice: 1mm

Slobodni kraj žice: 14mm

Tehnika rada: lijeva tehnika

Nagib pištolja: 30°

Limovi su prije zavarivanja očišćeni alkoholom od eventualnih nečistoća.

#### 5.5. Mjerenje debljine sloja cinka

U eksperimentu su korištena 3 para limova s različitim debljinama sloja cinka, kao što je prikazano u tablici 5.

**Tablica 5 Debljine sloja cinka na limovima korištenim u eksperimentu**

Debljina, [µm]	5...8	10...15	15...20
Uzorak	1	2	3
Limovi	1a, 1b	2a, 2b	3a, 3b

Kako bi se utvrdila debljina sloja cinka na pocinčanim limovima, prije samog zavarivanja provedeno je mjerenje sloja cinka na svakom od ukupno 6 limova, pri čemu je na svakom limu provedeno po 10 mjerenja. Rezultati mjerenja dani su u tablici 6.

**Tablica 6** Rezultati mjerenja debljine sloja cinka na limovima korištenim u eksperimentu

Lim	Debljina, [ $\mu\text{m}$ ]	$x_{\text{min}}$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$x_{\text{max}}$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$ , [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1a</b>	5...8	1,1	5,9	2,67
<b>1b</b>	5...8	2,8	4,9	3,96
<b>2a</b>	10...15	8,8	11,7	9,94
<b>2b</b>	10...15	9,9	11	10,46
<b>3a</b>	15...20	13,5	17,5	15,21
<b>3b</b>	15...20	13	20,8	15,36

Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala uređajem Elcometer 456, prikazanom na slici 27.



**Slika 27** Elcometer 456, uređaj za mjerenje debljine sloja zaštitne prevlake

## 5.6. Postupak zavarivanja

Slika 28 prikazuje pripremljene limove za zavarivanje.



Slika 28 Limovi spremni za zavarivanje

Početni parametri su prikazani u tablici 7.

Tablica 7 Početni parametri zavarivanja

Zaštitni plin	Protok plina, [l/min]	Promjer žice, [mm]	Jakost struje, [A]	Napon, [V]	Brzina zavarivanja, [cm/min]
Argon, 100%	16	1,0	100	11,5	50

Početni parametri određeni su proučavanjem radova koji su obradili sličnu temu, te uz pomoć djelatnika Laboratorija za zavarivanje na temelju iskustva.

Bilo bi dobro kada bi unos topline bio što manji kako bi se izbjeglo nepoželjno isparavanje cinka i deformacija limova. Kod konvencionalnih postupaka zavarivanja postoji općenito više vrsta prijenosa metala, koji su nabrojani u teoretskom dijelu rada. Najmanje vrijednosti struje su općenito kod prijenosa metala kratkim spojevima. Takav prijenos kratkim spojevima je karakterističan i kod CMT-a, s bitnom razlikom da je unos topline znatno manji nego kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jer CMT ima povratni hod žice koji omogućava

kontrolirano otkidanje kapljica i izbjegavanje velikih struja kratkog spoja koje uzrokuju veći unos topline.

Kod CMT-a isto tako nema prskanja koliko kod konvencionalnih postupaka, što poboljšava kvalitetu zavarenih spojeva izvedenih ovim postupkom.

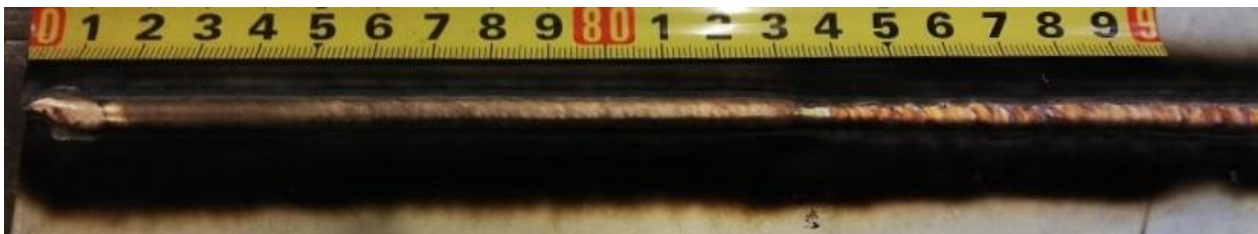
Tijekom procesa zavarivanja praćene su promjene parametara u odnosu na početne parametre, kao što je prikazano u tablici 8.

**Tablica 8 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 5 i 8 $\mu$ m - uzorak 1**

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	100	11,5
Tijekom zavarivanja	107	11

Iz tablice se da očitati da je tijekom zavarivanja došlo do porasta jakosti struje i pada napona. Struja je porasla za 7A, a napon pao za 0,5V.

Na slici 29 je prikazano lice spoja uzorka 1. Izgled zavara je dobar, nema pukotina i pora i nije došlo do prskanja.



**Slika 29 Uzorak 1 – lice**

Sljedeći par limova imao je zaštitni sloj cinka debljine između 10 i 15 $\mu$ m (uzorak 2). Promjene parametara tijekom zavarivanja prikazane su u tablici 9.

**Tablica 9 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 10 i 15 $\mu$ m - uzorak 2**

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	100	11,5
Tijekom zavarivanja	105	11,8

Iz tablice se da očitati da je tijekom zavarivanja došlo do porasta jakosti struje i napona. Struja je porasla za 5A, a napon za 0,3V.

Na slici 30 je prikazano lice spoja uzorka 2.



**Slika 30 Uzorak 2 – lice**

Kvaliteta spoja je dobra do jednog dijela nakon kojeg je vidljiv veći broj pora. Prisutnost pora znači da je došlo do isparavanja cinka u samom spoju. Nema prskanja kao ni kod prvog uzorka. Posljednji, 3. uzorak imao je debljinu sloja cinka između 15 i 20 $\mu$ m. Promjena parametara tijekom zavarivanja prikazana je u tablici 10.

**Tablica 10 Parametri zavarivanja limova sa slojem debljine cinka između 15 i 20 $\mu$ m - uzorak 3**

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	100	11,5
Tijekom zavarivanja	100	12

Kod ovog uzorka nije došlo do promjene struje, ali napon je porastao za 0,5V.

Na slici 31 je dan prikaz lica uzorka 3. Kao i kod drugog uzorka, nema prskanja. Vidljive su pore na površini spoja.



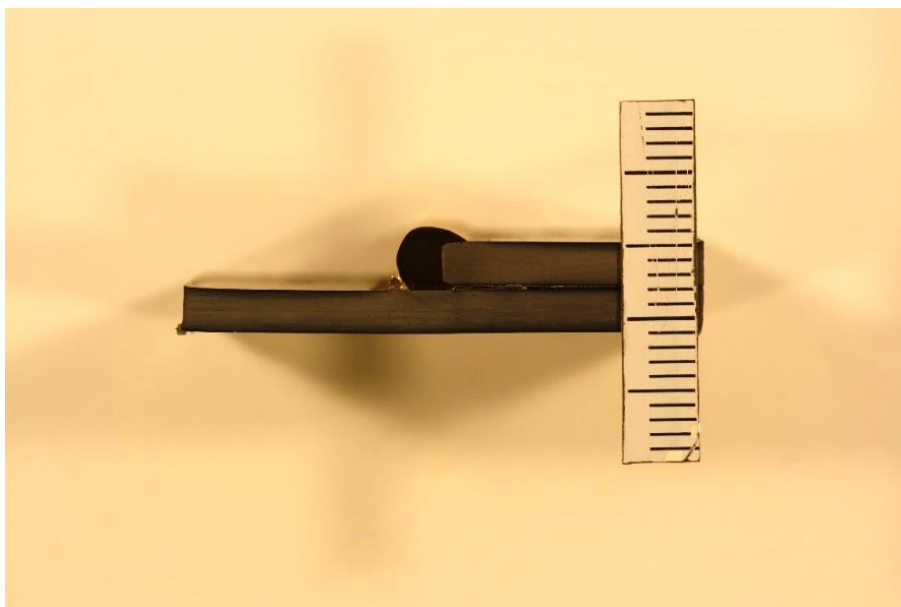
**Slika 31 Uzorak 3 – lice**

## 5.7. Priprema i ispitivanje makroizbrusaka

U sklopu eksperimentalnog dijela rada bilo je potrebno odrediti utjecaj postupka zavarivanja na debljinu i širinu pocinčanog sloja.

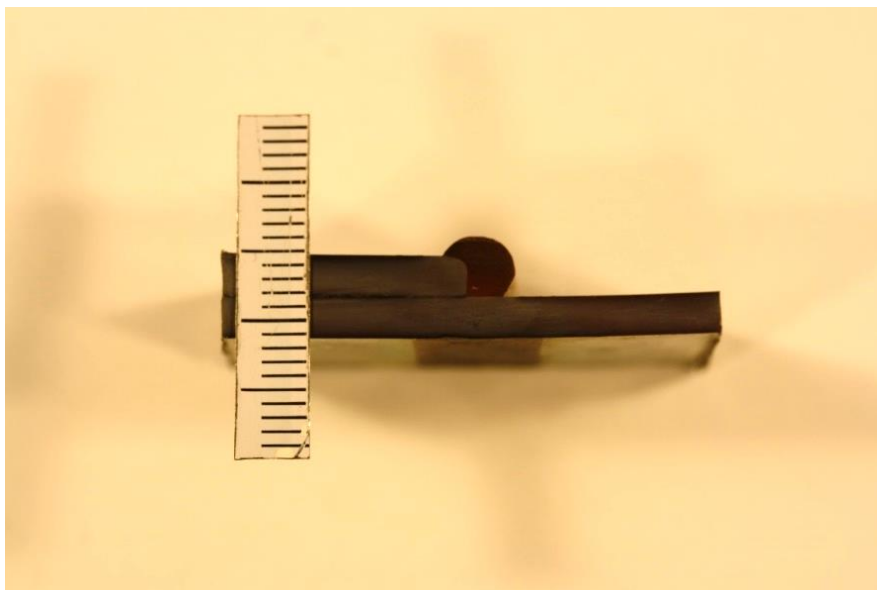
Kako bi to bilo utvrđeno na strojnoj pili su izrezana 3 uzorka makroizbrusaka, po jedan za svaki par limova, nakon zavarivanja. Poprečni presjeci makroizbrusaka su zatim bili brušeni brusnim papirima, od grublje prema finijoj obradi uz posljednju gradaciju P 100. Zatim su odneseni u Laboratorij za materijalografiju, gdje su brušeni na uređaju za brušenje s brusnom pločom, uz brzinu okretaja ploče 300o/min. Tokom brušenja tekla je voda za vodeno hlađenje i podmazivanje. Gradacije su pri tom bile P320, P500, P1000, P2000 i najfinije P4000. Nakon toga su izbrusci nagrizeni u 3%-tnom nitalu. Uronjeni su u otopinu za nagrivanje na 10 sekundi, a zatim su stavljani u posudu s vodom da se prekine kemijska reakcija i osušeni. Pripremljeni i osušeni makroizbrusci zatim su pregledani pod mikroskopom kako bi se utvrdilo je li došlo do isparavanja sloja cinka uz zavar.

Na slikama 32, 33 i 34 prikazani su makroizbrusci presjeka zavara uzoraka 1, 2 i 3 nakon nagrivanja u nitalnoj otopini.

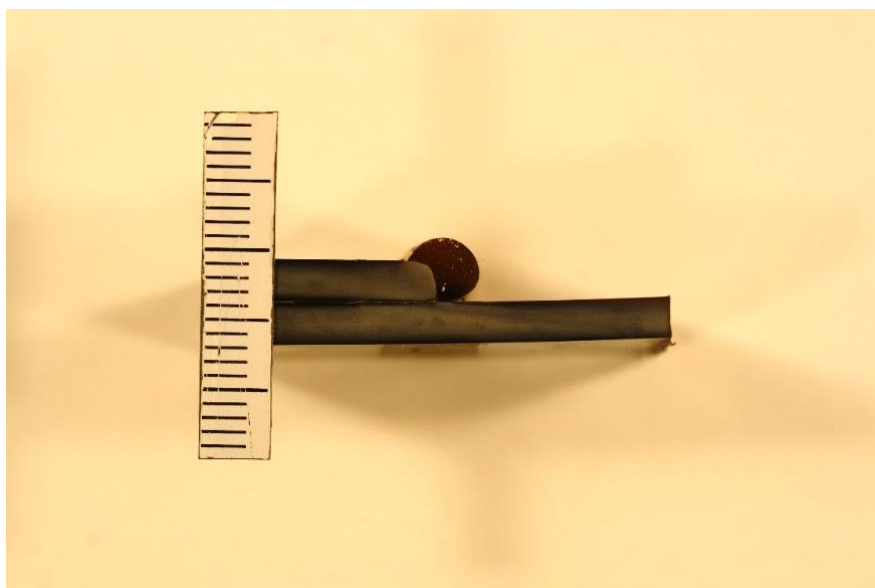


**Slika 32 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 1**



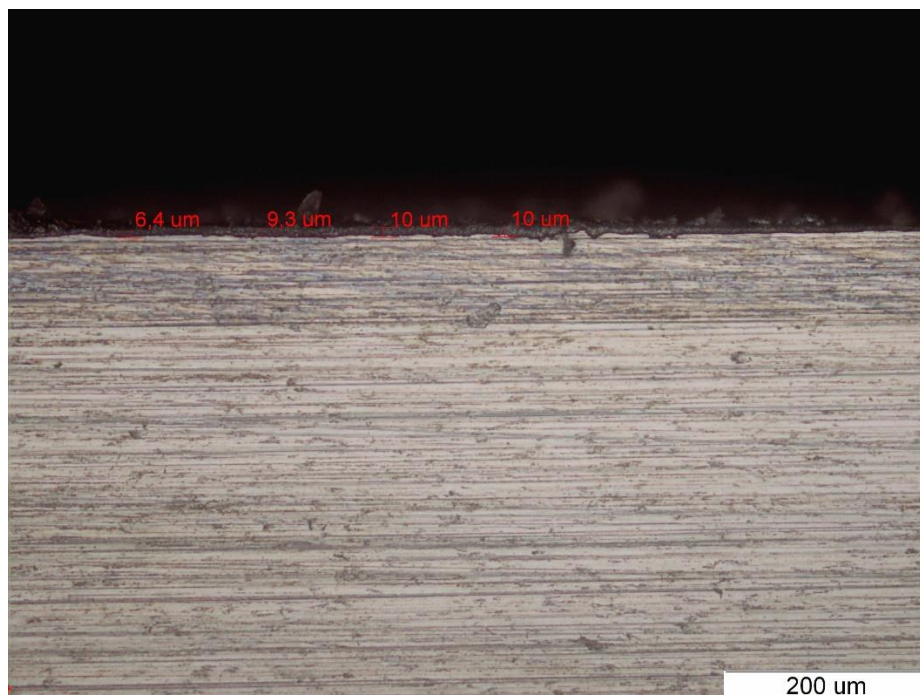


**Slika 33 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 2**

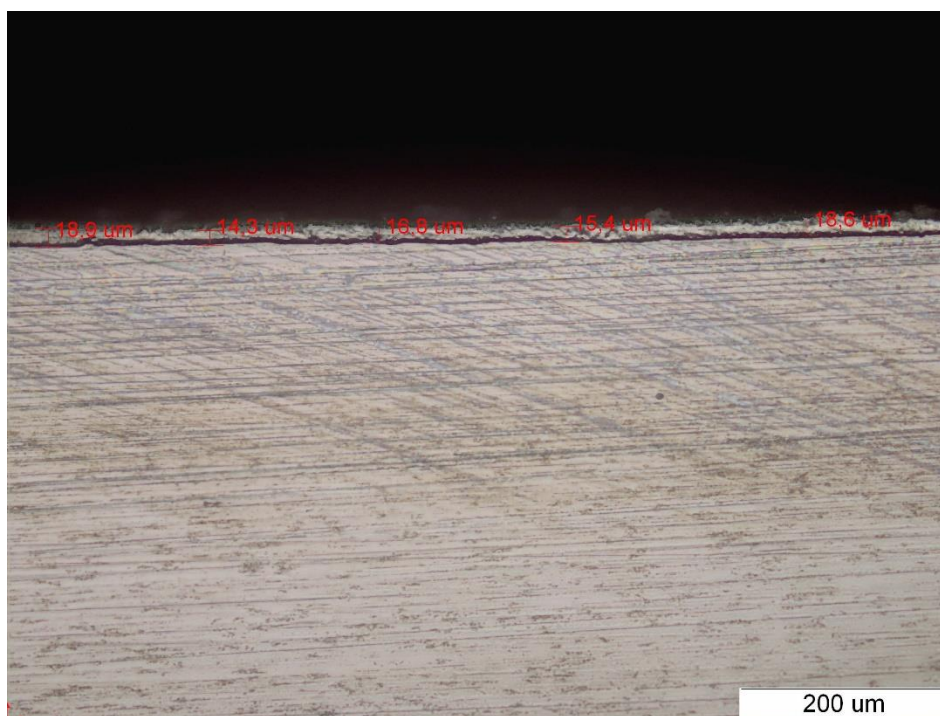


**Slika 34 Makroizbrusak presjeka zavara - uzorak 3**

Nakon pregleda makroizbrusaka pod mikroskopom utvrđeno je da je sloj cinka na sva tri uzorka ispario u blizini zavarenog spoja. Na prvom uzorku su slojevi cinka bili toliko tanki da ih čak ni pod mikroskopom nije bilo moguće uočiti, dok se na drugom i trećem uzorku na određenoj udaljenosti od samog spoja može primijetiti zaštitni sloj cinka. Na slikama 35 i 36 prikazani su makroizbrusci uzoraka 2 i 3 sa vrijednostima debljine cinkovog sloja.



**Slika 35** Debljina zaštitnog sloja cinka, gledano pod mikroskopom - uzorak 2



**Slika 36** Debljina zaštitnog sloja cinka, gledano pod mikroskopom - uzorak 3

Makroizbrusci, uslikani s mjerkom su uneseni u program ImageJ kojim je zatim izmjerena širina sloja bez cinka u blizini zavora. Rezultati mjerenja dani su u tablici 11.

**Tablica 11 Širina sloja bez cinka u blizini zavara na pojedinom uzorku**

Uzorak	1	2	3
Širina sloja bez cinka u blizini zavara, [mm]	1,96	1,58	2,46

Na slikama 37, 38 i 39 prikazani su makroizbrusci uzorka 1, 2 i 3.

**Slika 37 Naličje zavara uzorka 1****Slika 38 Naličje zavara uzorka 2**



**Slika 39** Naličje zavara uzorka 3

---

## 6. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme potreba za zavarivanjem pocinčanih predmeta sve je veća iz razloga što su današnje konstrukcije sve lakše, što znači i manjeg poprečnog presjeka pa je shodno time potrebna i adekvatna zaštita od korozije, a ona se vrlo često izvodi pocinčavanjem. Pocinčani limovi se primjenjuju na mostovima, zgradama, morskim plovilima i konstrukcijama, cjevovodima, elektranama, spremnicima za pohranu vode, kotlovima, za rasvjetne stupove, opremu za ceste, armature za betoniranje, u automobilskoj i brodograđevnoj industriji, željeznicama, za komunalnu opremu za javne gradske površine, metalne cijevi razne namjene te gotovo sve ostale čelične proizvode izložene atmosferskim utjecajima [11, 16].

CMT – Cold Metal Transfer („hladni prijenos metala“) je zapravo inačica MIG/MAG postupka zavarivanja pri kojoj je unos topline manji u odnosu na konvencionalne postupke koji koriste prijenos metala kratkim spojevima. Specifičnost ovog postupka je povratno gibanje žice koje kompenzira nedostatak plinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Primjena postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanje tankih limova (Al, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima. Korištenjem CMT postupka zavarivanja danas je moguće izvesti spojeve praktički bez prskanja. Uz to, postupak odlikuju točno i kontrolirano upravljanje duljinom električnog luka te velika mogućnost premošćivanja zazora.

U eksperimentalnom dijelu rada CMT postupkom zavarivanja zavarena su tri para limova, odnosno tri uzorka sa različitim debljinama zaštitnog cinkovog sloja. Nakon zavarivanja, vizualnom kontrolom je utvrđeno da lice spoja uzorka 1 izgleda zadovoljavajuće, dok je na licu spojeva uzoraka 2 i 3 vidljiv veći broj pora, što znači da nisu korišteni odgovarajući parametri zavarivanja. Povlači se zaključak da debljina pocinčanog sloja utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Naime, parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu su bili jednaki pri zavarivanju sva 3 uzorka, a kvaliteta spoja uzorka 1 bolja je od uzoraka 2 i 3. Nakon zavarivanja uzoraka izrađeni su makroizbrusci svakog od uzoraka. Na temelju dobivenih makroizbrusaka utvrđeno je da je sloj cinka u blizini zavara ispario na sva 3 zavarena uzorka. To bi u praksi bilo moguće riješiti korištenjem zaštitnih premaza na bazi cinka, kako bi se obnovio zaštitni sloj.

---

## 7. LITERATURA

- [1] Himmelbauer, K., Bruckner, J. : THE CMT – PROCESS – A REVOLUTION IN NEW WELDING GEOMETRY
- [2] Tomišić, M. : Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š. : Priručnik – Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015.
- [4] Torer, I. : Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [5] <https://e-ucenje.fsb.hr/mod/folder/view.php?id=8294> Fuš, H. : Zavarivanje – skripta.pdf, Zagreb, 2016.
- [6] Jurica, M. : Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [7] Kožuh, Z., Garašić, I. : Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [8] Jović, M. : RMT zavarivanje, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [9] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/2.%20RAD.pdf> Dostupno: 11.09.2019.
- [10] <http://www.tps-i.com/en/cmt/> Dostupno: 11.09.2019.
- [11] Udbinac, D. : Zavarivanje pocinčanih limova, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [12] Stupnišek-Lisac, E., Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.
- [13] Esih I., Dugi, Z. : Tehnologija zaštite od korozije, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [14] Juraga, I., Šimunović, V., Alar, V. : Autorizirana predavanja: Korozija i zaštita, FSB, 2017.
- [15] <https://e-ucenje.fsb.hr/mod/folder/view.php?id=8294> Fuš, H. : Toplinska obrada i površinska zaštita – skripta.pdf, Zagreb, 2016.
- [16] Tumara, G. : Zaštita pocinčanih čeličnih konstrukcija vodorazrijedivim premazima, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [17] <https://www.visitanglesey.co.uk/en/things-to-do/activities/landscape-menai-strait/#.XX7kWigzbIV> Dostupno: 12.09.2019.
-

- [18] <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/dalekovodi.aspx> Dostupno: 12.09.2019.
- [19] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> Dostupno: 13.09.2019.
- [20] [https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content\\_1/publikationen/precision\\_steel/produktinformationen\\_1/bau\\_stahl/thyssenkrupp\\_s355jr\\_product\\_information\\_precision\\_steel\\_en.pdf](https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/precision_steel/produktinformationen_1/bau_stahl/thyssenkrupp_s355jr_product_information_precision_steel_en.pdf) Dostupno: 13.09.2019.
- [21] <https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZMIGCUSI3.html> Dostupno: 13.09.2019.