

# Optimizacija parametara zavarivanja ovjesnih elemenata Formule student

---

Levatić, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:235:605396>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matija Levatić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Matija Levatić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentici dr. sc. Maji Jurici na svoj pruženoj pomoći pri izradi rada.

Zahvaljujem tehničkom osoblju sa Zavoda za zavarene konstrukcije na pomoći pri izradi praktičnog dijela rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Matija Levatić



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: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATIJA LEVATIĆ** Mat. br.: 9996001881

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA PARAMETARA ZAVARIVANJA OVJESNIH ELEMENATA FORMULE STUDENT**

Naslov rada na engleskom jeziku: **OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS FOR SUSPENSION ELEMENTS OF FORMULA STUDENT**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati karakteristike krom molibden (CrMo) čelika s posebnim naglaskom na primjenu u automobilskoj industriji i izradi šasija. Dati pregled postupaka prikladnih za zavarivanje uz detaljan opis problematike odabira dodatnog materijala i unosa topline. Pregledom literature navesti nekoliko primjera zavarenih proizvoda od krom molibdena, tehnologije zavarivanja istih kao i primjenu.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno definirati pripremu spoja i parametre zavarivanja za odabrane promjere i debljine stijenke cijevi. Dobivene zavarene spojeve potrebno je podvrgnuti razornim i/ili nerazornim ispitivanjima u svrhu ispitivanja adekvatnosti odabranih parametara zavarivanja.

U konačnici ocijeniti primjenjivost korištene tehnologije s obzirom na kvalitetu zavara i mehanička svojstva.

Zadatak zadan:  
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1 UVOD .....	1
2 ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE .....	2
2.1 Poboljšavanje čelika .....	2
2.2 Podjela čelika za poboljšavanje .....	6
2.3 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika.....	7
2.4 Zavarljivost čelika .....	8
2.5 Primjena krom molibden čelika u automobilskoj industriji i izradi šasija .....	8
3 Postupci zavarivanja- krom molibden čelici.....	11
3.1 TIG postupak zavarivanja.....	11
3.1.1 Dodatni materijal kod TIG zavarivanja.....	13
3.1.2 Greške kod TIG zavarivanja .....	14
3.1.3 Prednosti i nedostaci kod TIG zavarivanja .....	16
3.2 MIG postupak zavarivanja.....	17
3.2.1 Žice za MIG/MAG zavarivanje.....	19
3.3 Unos topline kod zavarivanja .....	21
4 Proizvodi od krom molibden čelika .....	24
5 Eksperimentalni dio .....	29
5.1 Ulazni podaci.....	29
5.2 Razrada postupka zavarivanja .....	31
5.2.1 Odabir materijala za zavarivanje.....	31

---

5.2.2	Odabir postupka zavarivanja.....	32
5.2.3	Izvor struje.....	32
5.2.4	Dodatni materijal.....	33
5.2.5	Odabir zaštitnog plina .....	34
5.2.6	Predgrijavanje.....	34
5.2.7	Specifikacija postupka zavarivanja .....	36
5.3	Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka .....	38
5.3.1	Rezultati ispitivanja.....	38
5.3.2	Ispitivanje radiografijom .....	38
5.3.3	Statičko vlačno ispitivanje .....	40
5.3.4	Izrada i analiza makroizbrusaka .....	42
5.3.5	Geometrija zavara .....	43
5.3.6	Mjerenje tvrdoće po presjeku.....	44
6	Zaključak: .....	47
	Literatura: .....	48
	PRILOZI.....	50

## POPIS SLIKA

Slika 1:	Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [3] .....	1
Slika 2:	Postupak poboljšavanja [7] .....	2
Slika 3:	$\sigma - \epsilon$ dijagram za različita stanja čelika u postupku poboljšavanja [7] .....	3
Slika 4:	Područja zajamčene prokaljivosti čelika za poboljšavanje [4] .....	3
Slika 5:	Postupak kaljenja [7].....	4
Slika 6:	Jominy krivulje prokaljivosti čelika za poboljšavanje [7] .....	5
Slika 7:	TIG postupak zavarivanja[12] .....	11
Slika 8:	Stanje vrha elektrode ovisno o vrsti struje koja se koristi tijekom zavarivanja [11] ..	12
Slika 9:	Poroznost [13].....	15
Slika 10:	Ugorine [13].....	15
Slika 11:	Nedovoljno protaljivanje [13].....	16
Slika 12:	Pretjerana penetracija [13] .....	16
Slika 13:	MIG/MAG zavarivanje [12] .....	17
Slika14:	Oblici žica punjenih praškom[16].....	20
Slika 15:	Ručno elektrolučno zavarivanje [14] .....	21
Slika 16:	Zavarivanje zaštitnog kaveza trkaćeg automobila [19] .....	25
Slika 17:	Automatski postupak TIG zavarivanja s okretanjem cijevi [20] .....	25
Slika 18:	Parametri postupka TIG zavarivanja s okretanjem cijevi [20] .....	26
Slika 19:	Automatsko orbitalno TIG zavarivanje s nepomičnim cijevima [20] .....	27
Slika 20:	Priprema zavara (a) i raspored prolaza zavarivanja (b) [20].....	27
Slika 21:	Podjela na sektore kod orbitalnog TIG zavarivanja [20] .....	28
Slika 22:	Parametri automatskog orbitalnog TIG zavarivanja s nepomičnim cijevima [20] .....	28
Slika 23:	Kinematički model vozila .....	29
Slika 24:	Prikaz ovjesa- prednji (lijevo) istražnji (desno).....	30
Slika 25:	Atest 25CrMo4 18 mm x 1,5 mm .....	31
Slika 26:	MasterTig MLS3003 ACDC.....	32
Slika 27:	Atest dodatnog materijala AWS A5.28: ER80S-G, 2mm.....	33
Slika 28:	Specifikacija postupka zavarivanja- uzorak A.....	36
Slika 29:	Specifikacija postupka zavarivanja- uzorak B .....	37
Slika 30:	Upravljačka jedinica RTG uređaja- Balteau 300 D .....	38
Slika 31:	Priprema uzorka za snimanje rendgenom .....	39
Slika 32:	Radiogram- položaj A.....	39



---

Slika 33: Radiogram- položaj B .....	40
Slika 34: Priprema uzorka na kidalici .....	40
Slika 35: Rezultati statičkog vlačnog pokusa- uzorak A.....	41
Slika 36: Rezultati statičkog vlačnog pokusa- uzorak B.....	41
Slika 37: Uzorak A nakon statičnog vlačnog pokusa.....	42
Slika 38: Uzorak B nakon statičkog vlačnog pokusa.....	42
Slika 39: Makroizbrusak- uzorak A .....	42
Slika 40: Makroizbrusak- uzorak B .....	43
Slika 41: Mjerenje površine zavara- uzorak B .....	43
Slika 42: Pozicije mjerenja tvrdoće po presjeku- uzorak A .....	44
Slika 43: Pozicije mjerenja tvrdoće po presjeku- uzorak B .....	45
Slika 44: Uređaj za mjerenje tvrdoće po presjeku metodom HV10.....	45

**POPIS TABLICA**

Tablica 1:	Podjela popuštanja prema temperaturi popuštanja [7] .....	5
Tablica 2:	Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [11] .....	12
Tablica 3:	Parametri zavarivanja 25CrMo4 čelika za izradu šasija automobila [18], [19] .....	24
Tablica 4:	Parametri postupka TIG zavarivanja s okretanjem cijevi .....	26
Tablica 5:	Tehničke specifikacije izvora struje MLS 3030 ACDC.....	33
Tablica 6:	Rezultati mjerenja geometrije zavara .....	44
Tablica 7:	Rezultati - mjerenje tvrdoće po presjeku.....	46

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
AC		Izmjenična struja
Al		Aluminij
Ar		Argon
CaF <sub>2</sub>		Kalcijev fluorid
CaO		Kalcijev oksid
C <sub>e</sub>		Ugljični ekvivalent
CO <sub>2</sub>		Ugljikov (IV) oksid
CNC		Računalom podržano numeričko upravljanje
Cr		Krom
Cu		Bakar
DCEN		Istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu
DCEP		Istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu
E <sub>ef</sub>		(Efektivni) unos topline
EPP		Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
F <sub>m</sub>		Maksimalna sila
He		Helij
HV		Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje
MAG		Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u aktivnom zaštitnom plinu
MIG		Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
Mn		Mangan
Mo		Molibden
NASCAR		Nacionalno udruženje za auto-moto utrke
Ni		Nikal
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
S <sub>k</sub>		Stupanj prokaljenosti, stupanj zakaljenosti
Si		Silicij
TIG, WIG, GTAW		Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa ili bez dodatnog materijala
TiO <sub>2</sub>		Titanijev (IV) oksid
U	V	Napon
V		Vanadij
v		Brzina zavarivanja
ZT		Zona taljenja
ZUT		Zona utjecaja topline
η		Stupanj korisnog djelovanja električnog luka

## SAŽETAK

U ovom radu opisan je razvoj tehnologije zavarivanja tankostijenih cijevi za ovjesne elemente bolida Formule student.

U teorijskom djelu opisane su karakteristike krom molibden čelika s posebnim naglaskom na primjenu u automobilskoj industriji i izradi šasija. Ukratko su opisani TIG i MIG postupci zavarivanja te navedeni neki primjeri zavarenih proizvoda od krom molibden čelika, tehnologije zavarivanja i primjene istih.

U eksperimentalnom dijelu definirana je priprema spoja te su određeni parametri TIG zavarivanja za dva različita uzorka čeonih zavara. Na zavarenim uzorcima provedena su sljedeća ispitivanja: radiografsko ispitivanje, statički vlačni pokus, analiza geometrije zavara i mjerenje tvrdoće po presjeku zavara.

U konačnici je ocijenjena primjenjivost korištene tehnologije s obzirom na kvalitetu zavara i mehanička svojstva.

Ključne riječi: zavarivanje, TIG, krom molibden čelici

## **SUMMARY**

This paper describes development of the welding technology for the thin wall tubes for suspension elements of Formula student race car.

The theoretical part describes the characteristics of chromium molybdenum steel with special emphasis on the application in the automotive industry and chassis construction. TIG and MIG welding processes are briefly described and some examples of welded products made of chromium molybdenum steel, welding technologies and applications are given.

In the experimental part, the preparation of the joint was defined and the TIG welding parameters were determined for two different samples of butt welds. The following tests were performed on the welded specimens: Radiographic testing of welds, static tensile test, measurement of the weld geometry and hardness test of the weld cross section.

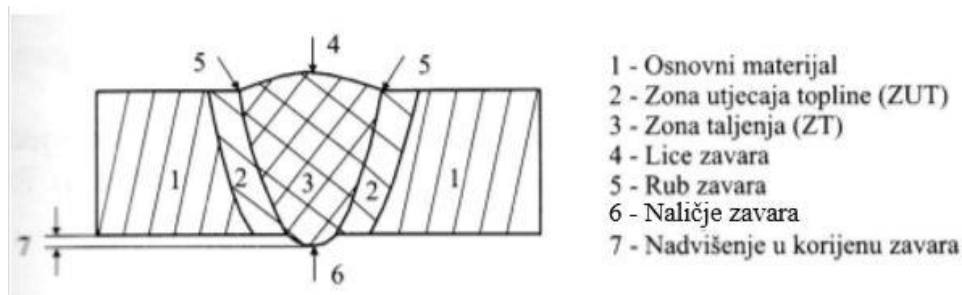
Finally, the applicability of the technology used with respect to weld quality and mechanical properties was evaluated.

Key words: welding, TIG, chromium molybdenum steels

## 1 UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, kojim se dobiva kontinuirani nerastavljivi spoj jednoličnih svojstava. Zavarivanjem se mogu spajati metalni (čelici, Al, Cu, Ni i njihove legure) i nemetalni materijali (termoplastični dijelovi i dr.).[1]

Zavareni spoj se sastoji od osnovnog materijala, zone taljenja ZT i zone utjecaja topline ZUT (ZUT se naziva i "prelazna zona"). Zona taljenja je onaj dio zavarenog spoja koji je za vrijeme zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i do skrućivanja. Može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline je dio osnovnog materijala, koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, a gdje dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava zbog topline unesene zavarivanjem. [1], [2] Na slici 1 u nastavku prikazani su elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu.



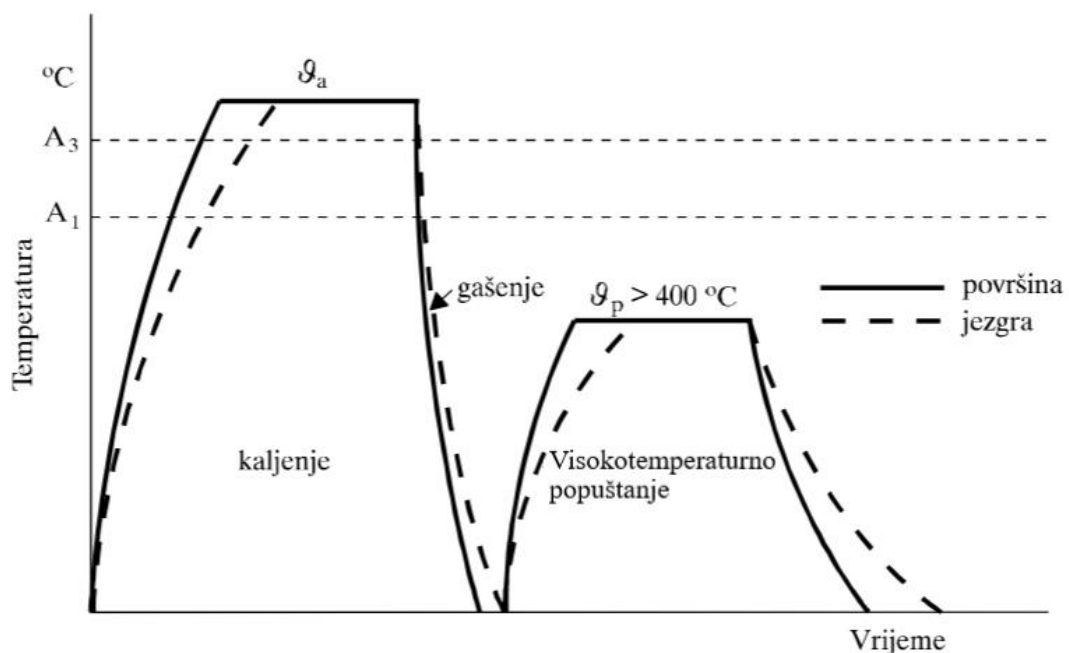
**Slika 1: Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [3]**

## 2 ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Čelici za poboljšavanje spadaju u skupinu nelegiranih i niskolegiranih konstrukcijskih čelika i najčešće sadrže od 0,2 % do 0,6 % ugljika. Prema kemijskom sastavu pripadaju skupini kvalitetnih i plemenitih čelika. Ova se skupina čelika obrađuje postupkom poboljšavanja s ciljem postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost. Najčešće se primjenjuju za mehanički i dinamički visoko opterećene dijelove strojeva kao što su vratila, osovine, zupčanici, poluge, vijci i zatici, koji nisu podvrgnuti jačem trošenju. [4], [5]

### 2.1 Poboljšavanje čelika

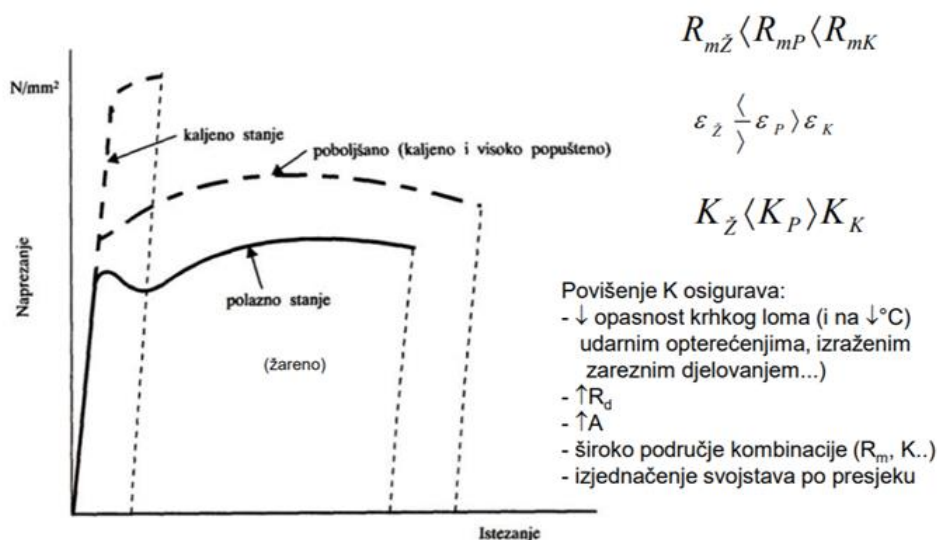
Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja s ciljem postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. [6] Postupak poboljšavanja prikazan je na slici 2 u nastavku.



**Slika 2: Postupak poboljšavanja [7]**

Rezultat poboljšavanja biti će bolji što je čelik gašenjem jednoličnije prokaljen. Na dubinu prokaljivanja– prokaljenost utječu tri skupine faktora: prokaljivost primjenjene vrste čelika, dimenzije dijela i uvjeti gašenja pri kaljenju. [6]  $\sigma$  -  $\epsilon$  dijagram za različita stanja čelika u postupku poboljšavanja prikazan je na slici 3.

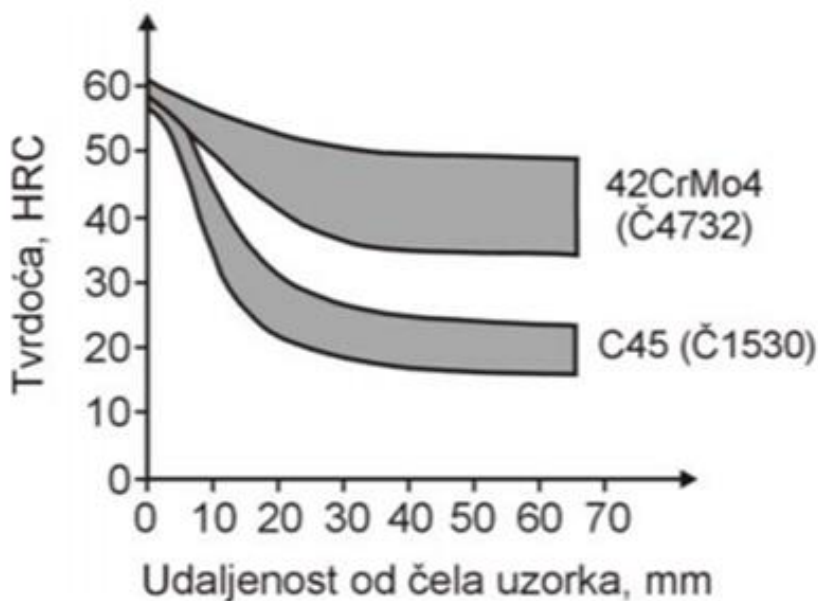


Efekti poboljšavanja u  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagramuSlika 3:  $\sigma$  -  $\epsilon$  dijagram za različita stanja čelika u postupku poboljšavanja [7]

Mjera prokaljenosti je tzv. stupanj zakaljenosti -  $S_k$  koji se definira kao omjer tvrdoće kaljenja na nekom mjestu presjeka i maksimalno postizive tvrdoće za dotični čelik. [5]

$$S_k = \frac{H_{kalj}}{H_{max}} = 0,72 - 1,00 \quad (1)$$

Područja zajamčene prokaljivosti čelika za poboljšavanje prikazana su na slici 4 u nastavku.

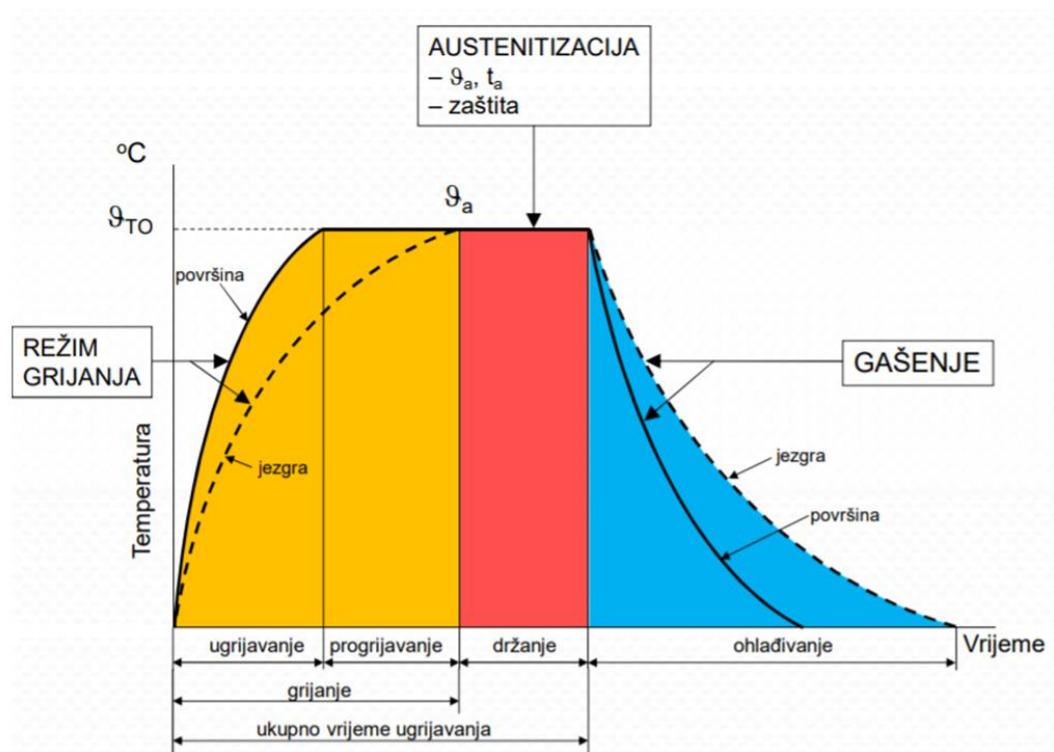


Slika 4: Područja zajamčene prokaljivosti čelika za poboljšavanje [4]

Vrijednost stupnja zakaljenosti  $S_k = 0,72$  odgovara približno 50 postotnoj martenzitnoj mikrostrukturi, a vrijednost  $S_k = 1,00$  odgovara 100 postotnoj martenzitnoj mikrostrukturi. Prokaljivost čelika se standardno određuje čeonim gašenjem Jominy metodom. Svaki čelik ima područje zajamčene prokaljivosti. [5]

Glavni ciljevi kaljenja čelika su postizanje maksimalno moguće tvrdoće čelika ovisno o udjelu ugljika u čeliku te postizanje što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku, odnosno što jednoličnijeg prokaljenja. Postupak kaljenja sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja, držanja na temperaturi austenitizacije u svrhu otapanja ugljika i legiranih elemenata u austenitu, te gašenja u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture. [6]

Postupak kaljenja prikazan je na slici 5 u nastavku.



**Slika 5: Postupak kaljenja [7]**

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na temperaturu ispod temperature  $A_1$  s ciljem povišenja žilavosti martenzita nastalog kaljenjem, redukcije zaostalih napreznja martenzita i postizanja dimenzijske postojanosti. Popuštanjem se snizuje tvrdoća postignuta kaljenjem što nije cilj već nužna posljedica popuštanja. [6]

Prema iznosu temperature popuštanja postupci popuštanja dijele se na niskotemperaturno, srednetemperaturno i visokotemperaturno popuštanje, kako je prikazano u tablici 1. Ugrijavanje martenzita na određenu temperaturu omogućuje difuziju atoma ugljika pri niskim temperaturama

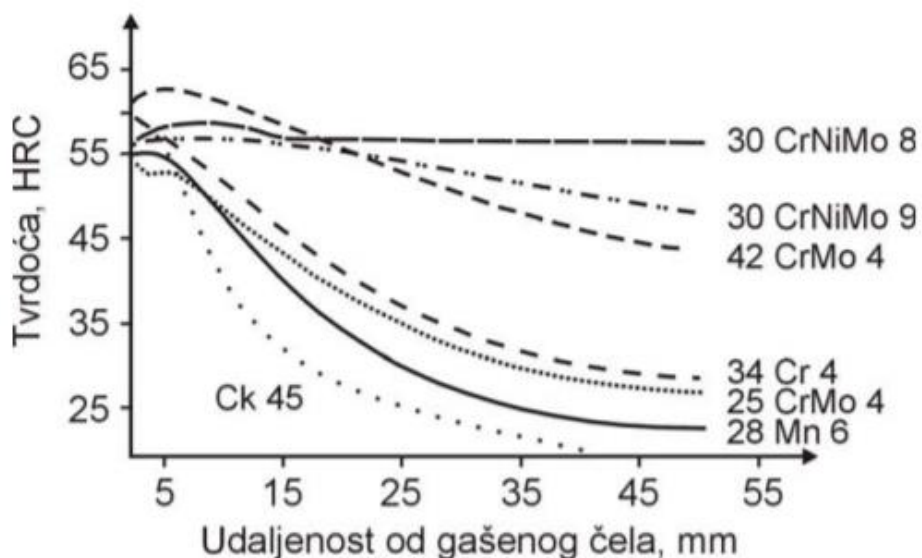
popuštanja, a difuziju atoma ugljika, željeza i legirnih elemenata pri visokim temperaturama popuštanja. [7]

**Tablica 1: Podjela popuštanja prema temperaturi popuštanja [7]**

Vrsta popuštanja	Temperaturno područje °C	Primjena
Nisko	do 220	- niskolegirani i ugljični alatni čelici za hladni rad - visokolegirani alatni čelici za hladni rad - pougljičeni čelici (za cementiranje) - čelici za kotrljajuće ležajeve (prokaljive vrste)
Srednje	220 ...450	- (čelici za opruge)
Visoko	Od 450 do $A_1$	- Visokolegirani alatni čelici za rad u toplom stanju - brzorezni čelici - čelici za poboljšavanje (i opruge) - čelici za kotrljajuće ležajeve (vrste za poboljšavanje)

Kada se čelik nalazi u zakaljenom stanju ima rešetku martenzita sa stupnjem tetragonalnosti većim od 1.

Tijekom popuštanja, zbog difuzije atoma ugljika, u nekim ćelijama kristalne rešetke dolazi do premještanja atoma ugljika na povoljnije mjesto i zbog toga do smanjenja stupnja tetragonalnosti, dok u nekim ćelijama atom ugljika u potpunosti izlazi iz rešetke i stupanj tetragonalnosti poprima vrijednost 1. Zbog ovih promjena stupnja tetragonalnosti dolazi do povišenja žilavosti popuštenog martenzita, sniženja zaostalih naprezanja i sniženja tvrdoće. [6] U nastavku su prikazane Jominy krivulje prokaljivosti čelika za poboljšavanje na slici 6.



**Slika 6: Jominy krivulje prokaljivosti čelika za poboljšavanje [7]**

Krom molibden i krom nikal molibden čelici dobro su prokaljivi, te za razliku od većine ostalih čelika za poboljšavanje, nisu skloni krhkosti nakon popuštanja zbog prisutnosti molibdena. Mogu poslužiti za rad pri temperaturama do 550 °C. Djelovanje molibdena osigurava martenzitnu i bainitnu (donji bainit) mikrostrukturu kod čeličnog proizvoda promjera iznad 250 mm i kod niskih temperatura do -70 °C, a posebno pozitivno utječe na povećanje otpornosti protiv krhkosti popuštanja. Dodatak vanadija pozitivno djeluje na usitnjavanje zrna, a time na žilavost pri sobnoj i sniženoj temperaturi. [4]

## **2.2 Podjela čelika za poboljšavanje**

Prema normama razlikujemo sljedeće skupine čelika za poboljšavanje:

- nelegirani,
- legirani s Mn, Mn-Si i Mn-V,
- legirani s Cr,
- legirani s Cr-Mo,
- legirani s Cr-V,
- legirani s Ni-Cr. [4]

Čelici za poboljšavanje se s obzirom na njihovu namjenu mogu podijeliti u dvije skupine: čelici za površinsko kaljenje i čelici za velike otkovke. [4], [5]

### **a) Čelici za površinsko kaljenje**

Plamenim ili indukcijskim površinskim kaljenjem može se postići visoka otpornost na trošenje i dinamička izdržljivost površinskih slojeva nekih čelika za poboljšanje. Takvim postupkom postižu se svojstva površine koja su slična svojstvima cementiranog čelika, ali su svojstva sredine presjeka znatno bolja. Površinski se mogu kaliti nelegirani ili niskolegirani čelici koji sadrže od 0,35 % do 0,60 % ugljika koji se zbog visoke toplinske vodljivosti mogu brzo zagrijavati i hladiti, a da ne dođe do velikih toplinskih naprezanja i površinskih napuknuća. Ova skupina čelika ima sniženi udio fosfora.[4], [5]

### **b) Čelici za velike otkovke**

Čelici za velike otkovke se primjenjuju kod otkovaka promjera iznad 100 mm. Prilikom hlađenja tako velikih presjeka dolazi do pojave temperaturnih razlika između površine i sredine presjeka što utječe na pojavu zaostalih naprezanja. Budući da se takva naprezanja ne mogu lako ukloniti postoji opasnost od pojave pukotina. Da bi se to izbjeglo zahtijeva se visoka čistoća čelika, izostanak segregacija i mikropukotina te jednolična svojstva i mikrostruktura preko cijelog

presjeka proizvoda. Posebnu opasnost kod velikih otkovaka predstavlja prisutnost otopljenog vodika što može dovesti do stvaranja šupljina u obliku pahuljica. Hlađenjem proizvoda velikog presjeka otopljeni vodik se ne može ispliniti te se nakuplja na defektima, najčešće na uključcima ili primarnim granicama zrna. Na tim mjestima zbog porasta tlaka dolazi do stvaranja šupljina i pukotina, a da bi se to spriječilo čelici moraju biti vrlo čisti i otplinjeni u vakuumu. Često se za uklanjanje vodika u čeličanama provodi žarenje velikih otkovaka. [4], [5]

### 2.3 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

Kemijski elementi koji se nalaze u čeliku dijele se na četiri skupine: prateći, skriveni, slučajni i legirni.

Prateći kemijski elementi u čeliku su oni koji se nalaze u samoj željeznoj rudi (mangan, silicij, fosfor i aluminijski), te oni koji ulaze tijekom prerade i čišćenja željezne rude (sumpor, mangan i silicij). Količina pratećih primjesa ovisi o kvaliteti polazne sirovine i kvaliteti samog postupka dobivanja čelika. Fosfor i sumpor su vrlo nepoželjni elementi u čeliku, te se prema njihovom udjelu vrši osnovna podjela čelika na:

- obični čelik - udio sumпора i fosfora pojedinačno ne smije biti veći od 0,06 %, a zajedno maksimalno 0,1 %,
- kvalitetan čelik - udio sumпора i fosfora pojedinačno ne smije biti veći od 0,045 %,
- plemeniti čelik - udio sumпора i fosfora pojedinačno ne smije biti veći od 0,03 %.

Skriveni kemijski elementi u čeliku su kisik, dušik i vodik. Oni se spajaju s legurom u procesu dezoksidacije. Njihov se udio, zbog složenosti procesa, vrlo rijetko provjerava.

Slučajni kemijski elementi su uglavnom bakar, olovo, kositar, antimon i arsen. Njihov udio i sadržaj ovisi o vrsti željezne rude koja je korištena kao sirovina.

Legirni elementi u čeliku su oni elementi koji se dodaju čeliku s ciljem poboljšavanja određenih svojstva. Rijetko koji materijal može toliko mijenjati svojstva legiranjem kao čelik. Kontroliranim dodavanjem primjesa, čeliku se može promijeniti samo jedno svojstvo ali i čitave kombinacije mehaničkih karakteristika. U čelicima se legirni elementi mogu pojaviti rastvoreni u BCC ili u FCC rešetki, kao spojevi sa željezom ili međusobno (karbidi i intermetalni spojevi) ili kao nemetalni ukljucci (oksidi, nitridi, sulfidi i fosfidi). [8]

U nastavku su opisani utjecaji legirnih elemenata koji se najčešće koriste u čelicima za poboljšavanje. [5], [8]

**Mangan** - djeluje dezoksidirajuće, na sebe veže sumpor, povišuje granicu razvlačenja konstrukcijskih čelika (otprilike 100 N/mm<sup>2</sup> za 1 % mangana). Čelici legirani manganom su skloni pregrijavanju (brz porast zrna pri visokim temperaturama) i krhkosti nakon popuštanja.

**Silicij** - dobar dezoksidator, povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, jako djeluje na povišenje granice elastičnosti i povisuje dinamičku izdržljivost. Čelici legirani silicijem pokazuju sklonost razugljičenju površine pri toplinskoj obradi, a pri cementiranju je otežana difuzija ugljika u čelik. Silicij blago povećava prokaljivost čelika.

**Vanadij** - jak karbidotvorac, povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama, usporava rast zrna pri povišenim temperaturama.

**Molibden** - najčešće se kombinira s drugim elementima, povisuje granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću te granicu puzanja. Kod krom-nikal i manganskih čelika dodaje se radi smanjenja opasnosti od pojave krhkosti nakon popuštanja. Povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate strukture i na povišenje prokaljivosti.

**Nikal** - gamageni element, ne tvori karbide nego se otapa u rešetki željeza, povisuje žilavost i pri niskim temperaturama, smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Najčešće se koristi kod nehrđajućih čelika, kemijski postojanih čelika, čelika za povišene i za niske temperature, vatrootpornih čelika i nemagnetičnih čelika.

**Krom** – jak karbidotvorac, tvori karbide tvrđe od cementita. Povisuje otpornost na pritisak i na abrazijsko trošenje te prokaljivost. Uz monofaznu strukturu i više od 12% Cr u čvrstoj otopini čelika dobiva se potpuna korozijska postojanost.

#### 2.4 Zavarljivost čelika

Preduvjet zavarljivosti čelika je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta  $C_e$ . Ugljični ekvivalent se računa prema formuli (2):

$$C_e = \% C + \frac{\% Mn}{4} + \frac{\% Cr + \% Mo + \% V}{5} + \frac{\% Ni + \% Cu}{10} \quad (2)$$

Prihvatljiva vrijednost ugljičnog ekvivalenta je  $C_e < 0,4$ . Čelici s višim udjelom ugljika zahtijevaju predgrijavanje kojim se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja.[3]

#### 2.5 Primjena krom molibden čelika u automobilskoj industriji i izradi šasija

Krom molibden čelici se često primjenjuju u okruženjima povišene temperature i visokog tlaka. Poznati su po izuzetnoj čvrstoći i otpornosti na povišene temperature, zbog čega se vrlo često koriste.

Molibden je već godinama standardni legirni element, a koristi se za proizvodnju čelika otpornog na puzanje koji može podnijeti temperaturu do 530 °C. Molibden uspješno smanjuje brzinu puzanja čelika, a također usporava koagulaciju i grubljenje karbida tijekom korištenja pri

povišenoj temperaturi. Nadalje, ova otpornost za visoke temperature i na puzanje, razlog je za primjenu čelika na bazi molibdena u proizvodnji električne energije i petrokemijskim postrojenjima. Međutim, kontinuirano povećanje sadržaja molibdena u čeliku radi daljnjeg poboljšanja njegovih svojstava ne uspijeva jer se duktilnost puzanja zapravo smanjuje s povećanjem udjela molibdena u leguri. Drugo ograničenje proizlazi iz činjenice da se na temperaturi iznad 500 °C odvija grafitizacija, odnosno razbijanje željeznih karbida. Ti nedostaci ometaju primjenu čelika temeljenih na molibdenu kao legirnom elementu. Rješenje je pronađeno u legiranju krom čelika s molibdenom. To daje čeliku brojne prednosti koje se ne nalaze u legurama na bazi molibdena, a krom molibden čelici bili su prvi koji su omogućili da temperatura pare u elektranama prelazi 500 °C.[9]

Ovaj dvojac legirnih elemenata djeluje dobro zbog njihovih kombiniranih svojstava. Na primjer, molibden daje čeliku veće radne temperature i dodatnu čvrstoću. Legiranje kromom rezultira izuzetnom oksidacijom i pomaže čeliku da se odupre koroziji na učinkovitiji način, te pruža dobru prokaljivost, a sadržaj molibdena osigurava da je tvrdoća ujednačena. Ova dodana čvrstoća i otpornost na koroziju objašnjava činjenicu da se krom molibden čelik koristi kada čvrstoća koju pružaju konvencionalni konstrukcijski čelici nije dovoljna. Ove pogodnosti pružaju dodatnu pouzdanost krom molibden čelika, zbog čega se koriste u toliko različitih primjena. Jedna od glavnih prednosti upotrebe ovog materijala za radne strojeve je njegova mogućnost površinskog očvršćivanja. Učvršćivanje kućišta omogućava da površina bude otporna na trošenje, a unutrašnjost ostaje razmjerno duktilna i manje krhka. Torzijska čvrstoća svojstvena krom molibden legurama izuzetno je važna u modernim motorima visokih performansi. Danas pojedini automobili imaju više od 300 konjskih snaga što je bilo nezamislivo prije nekoliko godina.[9], [10]

Radilice motora su jedan od primjera primjene krom molibden čelika u automobilskoj industriji. U prošlosti su se radilice proizvodile od lijevanog željeza, ali to je bilo u starijim automobilima koji nisu putovali daleko kao današnji automobili, a toplina se nije nakupljala ispod poklopca motora kao danas. Radilica izrađena od krom molibden čelika koristi se svim prednostima krom molibden čelika, uključujući otpornost na toplinu i trošenje i povećanu čvrstoću, osiguravajući da je motor automobila efikasan i da zahtijeva manje održavanja. Moderni dizelski motori također trebaju vrlo jake radilice. Radni strojevi imaju puno snage i okretni moment koji omogućuju opremi pomicanje ogromne količine zemljanih materijala (stijena, ugljena i pijeska). Hidraulički sustavi u ovoj opremi također zahtijevaju dobru vlačnu čvrstoću i otpornost na trošenje kako bi podigli velike kante i lopate koje su bile nečuvene prije samo nekoliko godina.

Materijal hidrauličkih osovina je većinom krom molibden čelik. Osovine i valjci na gusjeničnim strojevima gotovo su uvijek izrađeni od nekog krom molibden čelika.[9]

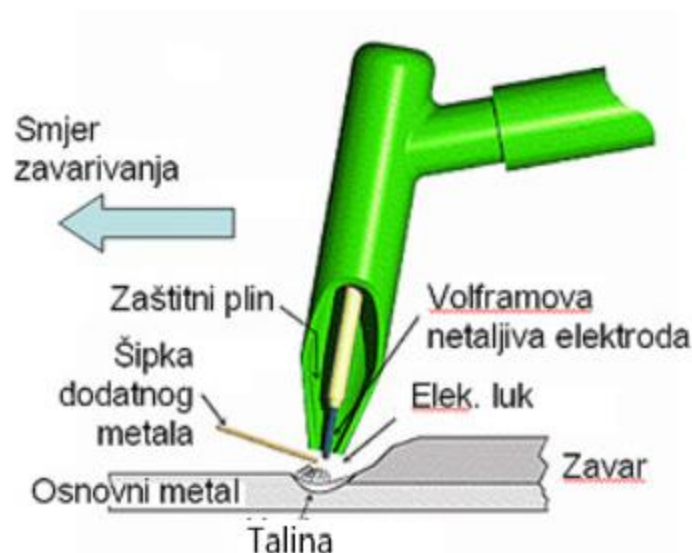
Suvremeni trkaći automobili imaju motore velike snage. Njihove okvire ne proizvode proizvođači automobila, već su izrađeni po mjeri kako bi zadovoljili zahtjeve NASCAR-a i ostalih trkačkih podružnica. Većina okvira (gotovo svi) proizvedeni su od krom molibden cijevi. Time se dobila mogućnost njihove izrade od tanjih materijala jer je čvrstoća veća od čvrstoće čelika s niskim udjelom ugljika. Zbog svoje duktilnosti, 25CrMo4 najpopularniji je za okvire trkaćih automobila. Iako je jači, 42CrMo4 s više ugljika nije tako duktilan, a krhkost materijala čini trkačke automobile nesigurnima za korištenje. Izrada okvira trkaćih automobila od krom molibden čelika postala je zasebna vrlo unosna industrija, jer okviri često prežive samo jednu ili dvije utrke budući da vozači i njihovi timovi stalno redizajniraju svoje automobile kako bi bili brži, jači ili stabilniji u zavojima. [9]



### 3 Postupci zavarivanja- krom molibden čelici

#### 3.1 TIG postupak zavarivanja

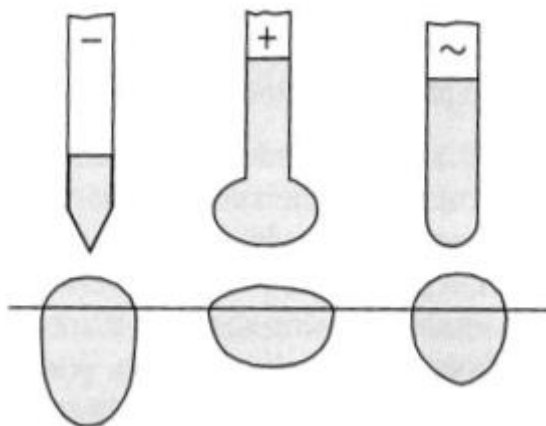
TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Kod TIG postupka zavarivanja električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, rastaljeni osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina. Proces zavarivanja izvodi se s dodatnim materijalom ili bez njega (pretaljivanje).[11]



Slika 7: TIG postupak zavarivanja[12]

Razvoj TIG zavarivanja počinje 1941. godine, a prvotno se razvijao za potrebe zrakoplovne industrije pri zavarivanju lakih metala. Kasnije se primjena TIG postupka proširila i na izradbu uređaja u kemijskoj i procesnoj industriji kod koje se zavaruju nehrđajući čelici, aluminij, bakar i njihove legure. [2]

Volframova elektroda kod ovog postupka služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode su izrađene od čistog volframa ili volframa legiranog s malim dodacima torijevog ili cirkonijevog oksida ili nekih drugih elemenata. Oksidi u elektrodi olakšavaju stabilizaciju i uspostavljanje električnog luka, smanjuju eroziju vrha elektrode, te povećavaju dopušteno strujno opterećenje. Ovisno o struji zavarivanja i vrsti osnovnog materijala vrh volframove elektrode poprima određeni oblik prema slici 8:[1], [3]



**Slika 8: Stanje vrha elektrode ovisno o vrsti struje koja se koristi tijekom zavarivanja [11]**

O primijenjenoj vrsti struje zavarivanja te polaritetu elektrode ovisi i raspodjela topline u električnom luku (raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada). Slijedom toga moguća su tri slučaja prikazana u tablici 2:

1. Istosmjerna struja – elektroda na "-" polu (DCEN)
2. Istosmjerna struja – elektroda na "+" polu (DCEP)
3. Izmjenična struja (AC).

**Tablica 2: Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [11]**

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet	-	+	
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka srednje duboka
Kapacitet elektrode	odličan npr: Ø3,2/400A	loš npr: Ø6,4/120A	dobar npr: Ø3,2/255A

Zavarivanje TIG postupkom istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom polu je najčešća kombinacija struje/polariteta kod primjene TIG postupka (DCEN – Direct Current Electrode Negative). Elektroni se gibaju s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk. Pri tome je količina kinetičke energije elektrona značajno veća od kinetičke energije iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manjeg pri vrhu elektrode

(približni odnos toplinskog opterećenja  $1/3$  na elektrodi,  $2/3$  na radnom komadu). Zbog toga ovaj način TIG zavarivanja omogućuje rad s manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama, a vrh elektrode treba biti zašiljen kako bi se uspostavio stabilan električni luk. Ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju. Postupak se koristi kod zavarivanja svih materijala osim aluminijskih, magnezijevih i njihovih legura.[11]

Pri zavarivanju TIG postupkom istosmjernom strujom kod kojeg je elektroda na pozitivnom polu (DCEP – Direct Current Electrode Positive) elektroni se gibaju s negativnog osnovnog materijala prema elektrodi pa je time i raspodjela topline drugačija – dolazi do velikog toplinskog opterećenja elektrode. Stoga je ovaj način zavarivanja moguć kod manjih struja zavarivanja uz primjenu netaljivih elektroda većeg promjera. Također, u odnosu na DCEN postupak zavarivanja, penetracija je manja, a zaobljenost vrha elektrode može rezultirati nestabilnošću električnog luka. Ipak, smjer pozitivnih iona s elektrode na radni komad rezultira razaranjem tankih površinskih oksida s površine osnovnog materijala, pa se ovaj postupak koristi za zavarivanje aluminijskih, magnezijevih i njihovih legura.

Zavarivanje TIG postupkom izmjeničnom strujom (AC – alternating current - izmjenična struja) je način TIG zavarivanja gdje se uz mogućnost dobrog čišćenja oksida s površine osnovnog materijala dobiva i dobra penetracija, a termičko opterećenje je približno podjednako na elektrodi i radnom komadu (iako ovisi o balansu izmjenične struje). Pri tome dolazi do mijenjanja pravca kretanja čestica (ovisno o frekvenciji struje), a time i do "gašenja i paljenja" luka što dovodi do njegove nestabilnosti. Utjecaj ove pojave može se smanjiti dodatnim uređajem na izvoru struje koji proizvodi visokonaponsku i visokofrekventnu struju u trenutku "gašenja" luka. Kod TIG AC zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje, ali i njezinim balansom (odnosom koliko vremena je elektroda na pozitivnom, a koliko na negativnom polu), utječe se na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i temperaturno opterećenje radnog komada i elektrode.[11]

### 3.1.1 Dodatni materijal kod TIG zavarivanja

Izvođenje TIG zavarivanja moguće je s korištenjem i bez korištenja dodatnog materijala. Zavarivanje bez dodatnog materijala, pretaljivanje, upotrebljava se najčešće do debljina stjenke od 3 mm. Ukoliko postoji potreba za dodatnim materijalom on se dodaje ručno ili automatizirano. Kod ručnog dodavanja materijala u zavareni spoj govori se o šipkama različitih promjera i duljine od približno 915 mm. Kod automatiziranog dodavanja dodatnog materijala dodatni se materijal mehanizirano dovodi do rastaljenog osnovnog materijala u "hladnom" ("coldwire") ili predgrijanom stanju ("hotwire"). Osnovna prednost ovakvog načina dovođenja

dodatnog materijala kod TIG zavarivanja je znatno povećanje produktivnosti procesa (veća količina depozita) čime se umanjuje najveći nedostatak TIG zavarivanja. [11]

Kod odabira dodatnog materijala vrlo je važno odabrati materijal što sličniji osnovnom materijalu po kemijskom sastavu, a u avionskoj industriji često koriste dodatni materijal malo boljih kemijskih i mehaničkih svojstava od onih osnovnog materijala. Pri odabiru dodatnog materijala važno je uzeti u obzir i promjer žice, koji prema preporukama ne smije biti veći od debljine stijenke koja se zavaruje, kako bi se postiglo taljenje osnovnog i dodatnog materijala jednakom brzinom. Postoji mnogo vrsta dodatnog materijala, a dijele se najčešće prema primjeni na žice za nelegirane čelike, žice za niskolegirane i srednje legirane čelike, žice za zavarivanje aluminija, žice za nehrđajuće (visokolegirane) čelike i na žice na bazi nikla. U nastavku ćemo razmotriti neke vrste dodatnog materijala koji se najčešće koriste za zavarivanje 25CrMo4 čelika.

U mnogim moto sportovima i zrakoplovnim primjenama, inženjeri žele određeni stupanj duktilnosti zavara kako bi pomogli apsorbirati udarce i spriječiti pojavu loma. Iz tog razloga, većina proizvođača namjerno smanjuje čvrstoću osnovnog materijala odabirom ER70S-2 kao dodatni materijal za zaštitne kaveze, šasije i druge primjene koje zahtijevaju veću fleksibilnost. Za područja koja zahtijevaju veću čvrstoću proizvođači odabiru ER80S-D2 dodatni materijal, kojim se postižu zavari visoke zatezne čvrstoće, ali uz slabije čišćenje zavara. Još jedna od mogućnosti je koristiti žicu od materijala istog osnovnom (čisti 25CrMo4), te je tada nakon zavarivanja obavezno vršiti žarenje zbog smanjenja zaostalih naprezanja, pa se navedeni način ne preporuča koristiti pri zavarivanju tankostijenih materijala.

Osim navedenih, postoje i mnogi drugi materijali pogodni za korištenje u specijaliziranim primjenama. Jedan od primjera je ER80S-G koji je zbog svojeg kemijskog sastava pogodan za zavarivanje toplinski obrađenih čelika te ima temperaturu primjene do 570 °C.

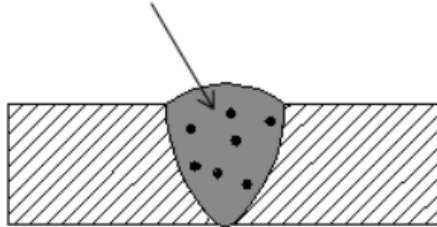
### 3.1.2 Greške kod TIG zavarivanja

Greške kod TIG zavarivanja su nepravilnosti koje nastaju u materijalu zavara kao posljedica korištenja neprikladnog postupka zavarivanja, pogrešnih parametara zavarivanja, itd., a mogu nastati unutar zavara (unutrašnje greške) ili na njegovoj površini (površinske greške). Neke se greške mogu prihvatiti ako se nalaze ispod dopuštenih granica, dok su druge u potpunosti neprihvatljive. [13]

Najčešće greške kod TIG zavarivanja su poroznost, ugorine, nedovoljno protaljivanje i pretjerana penetracija.

## Poroznost

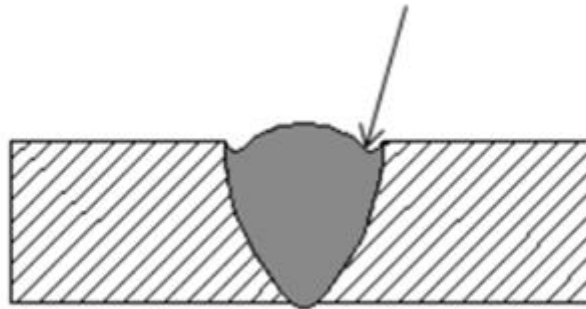
Poroznost je greška kod koje unutar zavara ostaju uključine nečistoća ili plinova. Kod TIG zavarivanja poroznost može nastati kao posljedica korištenja pogrešne količine zaštitnog plina, korištenja pogrešne vrste zaštitnog plina ili dodatnog materijala, prevelike topline ili zbog korištenja osnovnog materijala koji nije dovoljno čist. Poroznost je prikazana na slici 9.



**Slika 9: Poroznost [13]**

## Ugorine

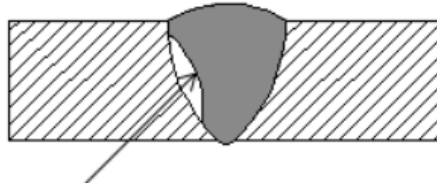
Ugorine su nedostaci u obliku udubljenja na rubovima šava. Uzroci nastanka ugorina mogu biti korištenje pogrešne elektrode, previsoki napon luka, pogrešan kut elektrode, korištenje elektrode prevelikog promjera, idr. Ugorine su prikazane na slici 10



**Slika 10: Ugorine [13]**

## Nedovoljno protaljivanje

Nedovoljno protaljivanje nastaje kada se osnovni materijal ne spoji u potpunosti s dodatnim materijalom, a može nastati kao posljedica korištenja slabije struje od one koja je potrebna za tu debljinu materijala, prevelikog razmaka između dijelova koji se zavaruju ili premalog kuta između stijenki. Nedovoljno protaljivanje je prikazano na slici 11.



**Slika 11: Nedovoljno protaljivanje [13]**

### Pretjerana penetracija

Pretjerana penetracija je greška kod koje se previše osnovnog metala rastali i počne istjecati iz korita zavora. Najčešći uzrok ove greške je prekomjerni unos topline u zavar. Unos topline moguće je smanjiti smanjenjem napona zavarivanja ili povećanjem brzine zavarivanja. [14] Pretjerana penetracija je prikazana na slici 12.



**Slika 12: Pretjerana penetracija [13]**

### 3.1.3 Prednosti i nedostaci kod TIG zavarivanja

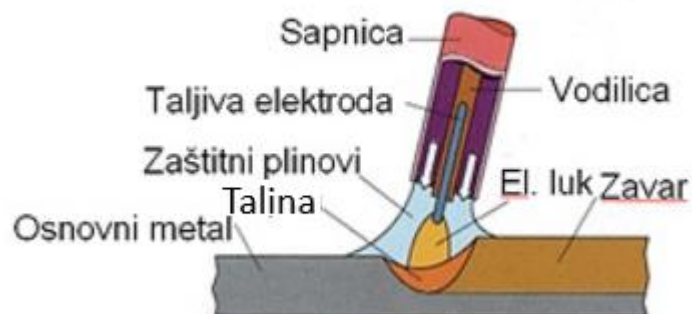
Jedna od prednosti TIG zavarivanja je korištenje netaljive elektrode. Takva se elektroda gotovo ne troši i nije potrebna česta zamjena elektrode što štedi puno vremena. Zavari su vrlo čisti nakon zavarivanja, a u većini slučajeva nije potrebno ni dodatno čišćenje zavora. TIG zavarivanje je pogodno za zavarivanje vrlo tankih materijala, te se može koristiti sa ili bez dodatnog materijala. Nadalje, može se koristiti za zavarivanje gotovo svih metalnih materijala, čak i aluminijske i bakrene te njihovih legura. Ovaj postupak ima relativno mali unos topline pa se zavareni dijelovi manje deformiraju. Postupak je pogodan za ručno zavarivanje, ali je po potrebi moguća i njegova automatizacija.

Najveći nedostaci TIG postupka su vrlo mala brzina zavarivanja, potrebna vrlo velika vještina zavarivača, vrlo visoki početni troškovi, problem kod zavarivanja na otvorenom i neekonomičnost korištenja kod vrlo debelih materijala. [15]

### 3.2 MIG postupak zavarivanja

MIG postupak je zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (argon ili helij). Za razliku od njega, MAG postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO<sub>2</sub> (MAGC postupak) ili mješavini s pretežnim udjelom CO<sub>2</sub> (MAGM postupak). Zaštitni plin kod ovih postupaka ima važnu ulogu zaštite električnog luka kao i rastaljenog materijala od utjecaja plinova koji se nalaze u okolnoj atmosferi. Električni se luk uspostavlja između osnovnog materijala i elektrodne žice (u pravilu spojene na „+“ pol izvora istosmjerne struje). U čistim plinovima koji se koriste u ovim postupcima otežana je ionizacija luka, zbog čega se ne koristi izmjenična struja. Osnovni materijal i metalna elektroda (žica) tale se zbog topline električnog luka, žica također služi kao dodatni materijal jer se njenim taljenjem popunjava unaprijed pripremljeni žlijeb. [1]

Električna struja dolazi iz izvora struje priključenog na električnu mrežu, a dovodi se vodičima, od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi preko razvoda upravljačkog ormara na pištolj za zavarivanje. Zaštitni plin se dovodi na mjesto zavarivanja iz boce preko upravljačkog ormara kroz sapnicu pištolja. Zaštitni plinski omotač koji dolazi sapnicom pištolja upuhuje se u atmosferu luka. Pištolj može istodobno odsisavati plinove nastale zavarivanjem. Kontaktna vodilica pištolja služi za vođenje elektrode i za prenošenje struje zavarivanja do elektrodne žice, a sapnica za plin služi za dovođenje zaštitnog plina. Kontaktna vodilica pištolja i sapnica za plin su potrošni dijelovi te se lako mogu mijenjati. Pištolj za zavarivanje može biti hlađen zrakom (zavarivanje tankih limova žicama do promjera oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veću jakost struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti, npr, kod bakra). [1]



Slika 13: MIG/MAG zavarivanje [12]

Pri zavarivanju MIG/MAG postupkom oblik prijenosa metala električnim lukom ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu žice, te

karakteristikama izvora struje zavarivanja ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka razlikuje se četiri načina prijenosa metala električnim lukom:

Prijenos metala kratkim lukom upotrebljava se pri zavarivanju žicama promjera 0,8 do 1,2 mm, a zavarivanje se izvodi kratkim spojevima. Raspon struje i napona kod prijenosa materijala kratkim lukom je  $I=50-170$  A,  $U=13-21$  V. Metalna kap na vrhu elektrode se povećava i zbog male duljine luka u jednom trenu dodirne osnovni materijal. Tada nastane kratki spoj, električni se luk na kratko prekida, a napon padne na nulu. Struja zavarivanja u tom trenu naglo poraste i pomaže otkidanju kapi s vrha elektrode. Nakon otkidanja kapi uspostavlja se električni luk i ciklus se ponavlja. U jednoj sekundi ponavlja se 150 do 250 ciklusa. Zbog male količine rastaljenog materijala ovaj način pogoduje zavarivanju tankih limova, korijenskog zavora i za zavarivanje u prisilnim položajima.

Prijenos materijala štrcajućim lukom karakteriziraju visoki napon ( $U=25-40$  V) i jaka struja ( $I=cca$  230-600 A). Poznato je da kod vrlo velikih struja i povišenih napona dolazi do „pinch-efekta“ koji dovodi do odvajanja malih finih kapljica koje idu u talinu. Zbog brzog prijelaza kapi vrijeme zagrijavanja je vrlo kratko pa se skraćuje vrijeme trajanja metalurških reakcija. Posljedica je slabi odgor legiranih i pratećih elemenata. Karakteristike štrcajućeg luka su prijenos sitnih metalnih kapi u mlazu slobodnim letom i bez kratkih spojeva, uz stalno održavanje električnog luka. Ovim se postupkom postižu visoka ekonomičnost i učinak taljenja jer je gustoća struje veća od  $300$  A/mm<sup>2</sup>. Štrcajući luk se najčešće primjenjuje kod zavarivanja žicama većeg promjera (1,2-2mm), popunjavanja žlijebova na debelim limovima i navarivanja detalja. Zbog velikog unosa topline penetracija u metal je duboka, pa je zavarivanje štrcajućim lukom pogodno za zavarivanje debljih komada, ali samo u vodoravnom položaju jer bi u drugim položajima talina iscurila iz žlijeba.

Prijenos metala mješovitim ili prijelaznim lukom postiže se kod napona 22-25 V i struji od 170 do 235 A. Metal se prenosi djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk. Pri tome je omogućeno kidanje manjih kapi koje pri tome prilično prskaju naokolo. Prskanje je manje u mješavini s argonom nego u čistom CO<sub>2</sub>.

Danas se sve više koristi prijenos metala djelovanjem impulsnih električnih struja (impulsni ili pulsirajući električni luk). Impulsni luk se postiže samo pod zaštitom argona ili mješavine bogate argonom, a pruža mogućnost dobrog zavarivanja aluminijskog, bakra i CrNi čelika. Za impulsne uređaje za zavarivanje karakterističan je strujni impuls određene frekvencije i trajanja. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, a kap se otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom, te se na taj način lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, te izvodi zavarivanje

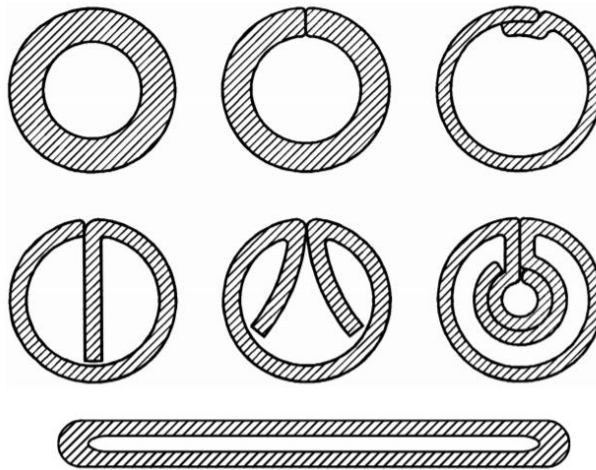


u prisilnim položajima. Frekvencija impulsa, a time i broj kapi, može se namještati. Glavne prednosti primjene impulsnog luka su jednoličan zavar, manje prskanje, stabilan luk i kod manjih jakosti struje, široko područje struje zavarivanja za žicu određenog promjera, mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijale i primjenjivost u svim položajima zavarivanja.

### 3.2.1 Žice za MIG/MAG zavarivanje

Kod zavarivanja MIG/MAG postupkom koriste se pune žice promjera od 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm koje se namotavaju na kolute ili žice punjene praškom. Za dobivanje zavara tražene kvalitete dodatni materijal treba ispuniti nekoliko uvjeta u pogledu kemijskog sastava, kvalitete površine, odmatanja s koluta tijekom zavarivanja idr. Kemijski sastav žice treba biti sličan sastavu osnovnog materijala. Zbog boljeg električnog kontakta i veće otpornosti na koroziju pune žice su pobakrene ili poniklane. Površina žice mora biti glatka, točnih dimenzija i uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za namatanje. Kvaliteta namatanja žice na kolut mora biti takva da se žica tijekom zavarivanja pravilno i jednako odmatata sa koluta.

Praškom punjena žica za MAG zavarivanje izrađena je posebnom tehnologijom u obliku cjevčice punjene mineralnim ili metalnim praškom. Prašak u žici (jezgra) je mineralnog, rutilnog ili bazičnog tipa, a može biti i metalnog tipa. Mineralni prašak u procesu zavarivanja ima istu funkciju kao i obloga elektrode kod REL postupka zavarivanja, a osim toga, poboljšava mogućnost zavarivanja u svim položajima, osigurava mogućnost većeg opterećenja strujama zavarivanja i mikrolegiranjem poboljšava svojstva metala zavara. Metalni prašak nema takva svojstva, ali njegov kemijski sastav poboljšava zavarivačka svojstva. Stupanj punjenja kod praškom punjenih žica predstavlja omjer mase jezgre i ukupne mase praškom punjene žice, prvenstveno ovisi o načinu izrade, ali i o obliku presjeka žice i u većini slučajeva se kreće od 14 % do 20 %, a ponekad i preko 25%. [16]



**Slika14: Oblici žica punjenih praškom[16]**

Jezgra rutilnih punjenih žica sadrži više od 50 % rutila ( $\text{TiO}_2$ ), koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka. Kod rutilnih punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj  $\text{TiO}_2$  doseže i do 65 %.

Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom su:

- lako namještanje parametara zavarivanja,
- brzo skrućivanje i lako skidanje troske, pogodna je za zavarivanje u prisilnom položaju,
- prijenos metala štrcajućim lukom uz vrlo malo prskanja,
- zavar ima lijepu i glatku površinu,
- stabilan i miran električni luk,
- kvalitetno provarivanje korijena zavara bez primjene podloge

Komponente jezgre žice punjene bazičnim mineralnim praškom su najčešće  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$ . Pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom postiže se bolja kvaliteta zavarenog spoja nego pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom. Najveći doprinos kvaliteti daje bazična troska koja nastaje u procesu zavarivanja i iz rastaljenog materijala odstranjuje nečistoće i komponente koje tvore dostatnu količinu plinova koji štite talinu zavara od utjecaja atmosfere, te na taj način sprječavaju nastanak poroznosti.

Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom su:

- potreba za točnim namještanjem parametara zavarivanja,
- vrlo dobra mehanička svojstva zavara,
- mala vjerojatnost pojave pukotina i poroznosti,
- primjenjivost pri zavarivanju tanjih materijala,
- stabilan električni luk u procesu zavarivanja,
- prijenos metala u obliku krupnih kapljica,

- izrazita osjetljivost na vlagu. [16]

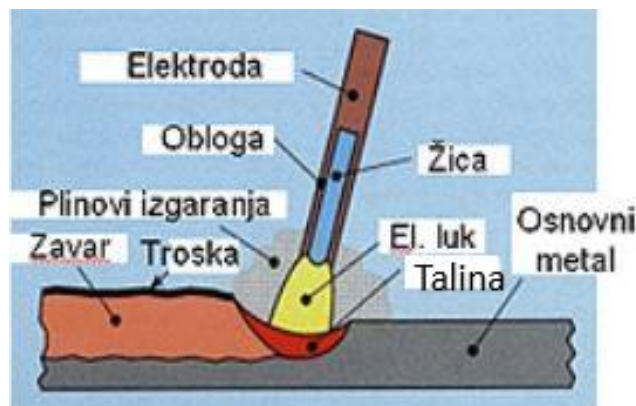
Pri izradi žica punjenih metalnim praškom moguće je djelovati na njihov kemijski sastav, koji je uglavnom isti kao kod osnovnog materijala za čije se zavarivanje i primjenjuju. Te se žice pretežno upotrebljavaju za zavarivanje visoko legiranih čelika koji na niskim temperaturama imaju visoku čvrstoću i žilavost.

Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim metalnim praškom su:

- mogućnost ekonomičnog utjecaja na sastav jezgre pomoću udjela komponenata punjenja,
- mala količina troske koju nije potrebno odstranjivati nakon svakog prolaza,
- približno 20 % veći učinak taljenja nego pri zavarivanju ostalim punjenim žicama,
- veća dubina provarivanja zbog veće jakosti struje zavarivanja,
- visok koeficijent iskorištenja (od 85 % do 95 %),
- širok i stabilan električni luk,
- prijenos metala finim kapljicama (štrcajući luk) je moguć i kod nižih struja zavarivanja,
- primjenjivost pri automatskim postupcima zavarivanja i mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima,
- dobro premošćivanje razmaka u grlu (zazoru) žlijeba.[16]

### 3.3 Unos topline kod zavarivanja

Elektrolučni postupci zavarivanja međusobno se razlikuju ali svima je zajedničko da postoji električni luk i ubrajaju se u postupke zavarivanja taljenjem materijala. Električni luk se uspostavlja između dvije elektrode, kod zavarivanja to su elektroda (koja može biti i dodatni materijal) i radni komad. Postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja prikazano je na slici 15:



**Slika 15: Ručno elektrolučno zavarivanje [14]**

Električni luk je intenzivno izbijanje u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji nastaju prvenstveno od metala elektrode, obloge, zaštitnih plinova ili praškova. Propisivanje

parametara zavarivanja neophodno je za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja. Pravilnim propisivanjem i provođenjem parametara zavarivanja osigurava se kvalitetan zavar, zavar bez proizvodnih, strukturnih i geometrijskih pogrešaka, odnosno s potrebnim mehaničkim svojstvima. Skup glavnih parametara zavarivanja za određeni materijal i geometriju (debljina, ostale dimenzije) čine:

- napon električnog luka,  $U$  [V]
- jakost struje za zavarivanje,  $I$  [A]
- brzina zavarivanja,  $v$  [m/s]
- stupanj iskorištenja energije u električnom luku,  $\eta$  [-]
- unesena toplina,  $E_{ef}$  [J]
- međuprolazna temperatura
- i temperatura predgrijavanja.

Pomoću vrijednosti jakosti struje ( $I$ ), napona električnog luka ( $U$ ), brzine zavarivanja ( $v_z$ ) i stupnja iskorištenja energije u električnom luku ( $\eta$ ) definira se i unos topline ( $E$ ). Veza između navedenih veličina i unosa topline može se pokazati izrazom:

$$E = \frac{U \cdot I}{v}, \frac{J}{\text{mm}} \quad (3)$$

$$E_{ef} = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v}, \frac{J}{\text{mm}} \quad (4)$$

U navedenim izrazima  $E$  je vrijednost unosa topline, a  $E_{ef}$  vrijednost efektivnog unosa topline koji uzima u obzir stupanj iskorištenja energije u električnom luku.

Da bi određivanje unosa topline bilo dovoljno točno, potrebno je poznavati vrijednost stupnja korisnog djelovanja električnog luka. Vrijednosti stupnja korisnog djelovanja u električnom luku za pojedine postupke elektrolučnog zavarivanja prema normi HRN EN 1011-1 su:

- REL postupak zavarivanja:  $\eta = 0,8$
- MAG/MIG postupak zavarivanja:  $\eta = 0,8$
- TIG postupak zavarivanja:  $\eta = 0,6$
- EPP postupak zavarivanja:  $\eta = 1$

Temperatura predgrijavanja je značajna iz više razloga. Predgrijavanjem se unosi toplina što povećava ukupno unesenu toplinu u zavar. Predgrijavanjem se unosi tzv. sekundarna toplina u zavareni spoj, pa se tako smanjuje brzina hlađenja, čime se daje mogućnost dužeg trajanja izlaska vodika iz zavarenog spoja i smanjuje vjerojatnost nastajanja hladnih pukotina. Pored toga, predgrijavanjem se s površine lima odstranjuje tzv. vezana vlaga, i smanjuju zaostale napetosti nastale tijekom zavarivanja. Da bi se izbjegla pojava hladnih pukotina, temperatura

predgrijavanja mora biti dovoljno visoka kako bi hlađenje zavarenog spoja nakon zavarivanja bilo dovoljno dugo zbog mogućnosti izlaska vodika iz zavarenog spoja. Vrijednost temperature predgrijavanja ovisi o udjelu kemijskih elemenata u osnovnom materijalu, odnosno kemijskom sastavu kao i debljini osnovnog materijala i udjela difuzijskog vodika u zavarenom spoju. Temperatura između prolaza je praktično temperatura predgrijavanja za sljedeći prolaz, mjerena na sredini šava.

## 4 Proizvodi od krom molibden čelika

Za podvozje trkaćih automobila, kao i za mnoge druge moto sportove i primjene u zrakoplovnoj industriji često se koristi materijal 25CrMo4, koji je odabran zbog svoje kombinacije duktilnosti, čvrstoće, težine i prednosti kod izrade kao što su laka oblikovljivost i dobre strojne obradljivosti. On ima relativno nizak sadržaj ugljika (nominalno 0,30 %) zbog čega je vrlo pogodan za zavarivanje, strojnu obradu i savijanje[18]. U nastavku su u tablici 3 i slici 16 prikazani najvažniji parametri i savjeti za zavarivanje 25CrMo4 čelika na primjeru izrade šasije i zaštitnog kaveza za trkaći automobil: [18], [19]

**Tablica 3: Parametri zavarivanja 25CrMo4 čelika za izradu šasija automobila [18], [19]**

Materijal	25CrMo4 cijevi (normalizirano stanje)
Debljina stijenke	Manja od 3 mm. Većina cijevi za izradu šasija ima debljinu stijenke između 1 mm i 2,1 mm i promjer cijevi od 6,5 mm do 40 mm.
Vrsta struje	Istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu (DCEN)
Jakost struje	Okvirna vrijednost od 10 A za 0,25 mm debljine stijenke (20-50 A)
Napon	9-12 V
Impulsna struja	Po potrebi
Dodatni materijal	ER70S-2,ER70S-6 ili ER80S-D2.
Promjer dodatnog materijala	0,75 mm do 3 mm. Važno: ne koristiti promjer dodatnog materijala veći od debljine stijenke osnovnog materijala.
Promjer elektrode	1,6 mm do 2,3 mm (manji promjer za tanje stijenke osnovnog materijala).
Priprema elektrode	Šiljasti vrh.
Duljina luka	Manja ili jednaka promjeru elektrode. Generalno, što manje tim bolje jer manja duljina luka smanjuje unos topline.
Duljina elektrode izvan pištolja	Ne veća od unutarnjeg promjera sapnice koja se koristi za zavarivanje.
Zaštitni plin	100% argon, 7 do 10 l/ min. Više plina nije dobro jer turbulencija može povući zrak u zavar.
Protok plina prije zavarivanja	4 do 6 sekundi
Protok plina poslije zavarivanja	10 do 15 sekundi
Predgrijavanje	Nije potrebno sve dok je osnovni materijal na temperaturi većoj od 21 °C.
Uklanjanje zaostalih naprezanja	Nije potrebno za materijal tanji od 32 mm, dovoljno je hlađenje na zraku.
Pozicioniranje zavarivanjem	4 zavara razmaknuta za 90°; idealno je da su zavari duži nego što su široki.
Priprema spoja	Rezanje, namještanje, skidanje oštih rubova i čišćenje površine.



**Slika 16: Zavarivanje zaštitnog kaveza trkaćeg automobila [19]**

Jedna od primjena krom molibden čelika je i za dijelove parnih kotlova. U nastavku je prikazan opis procesa kojim se rade čeonni zavari za dijelove kotlova. [20]



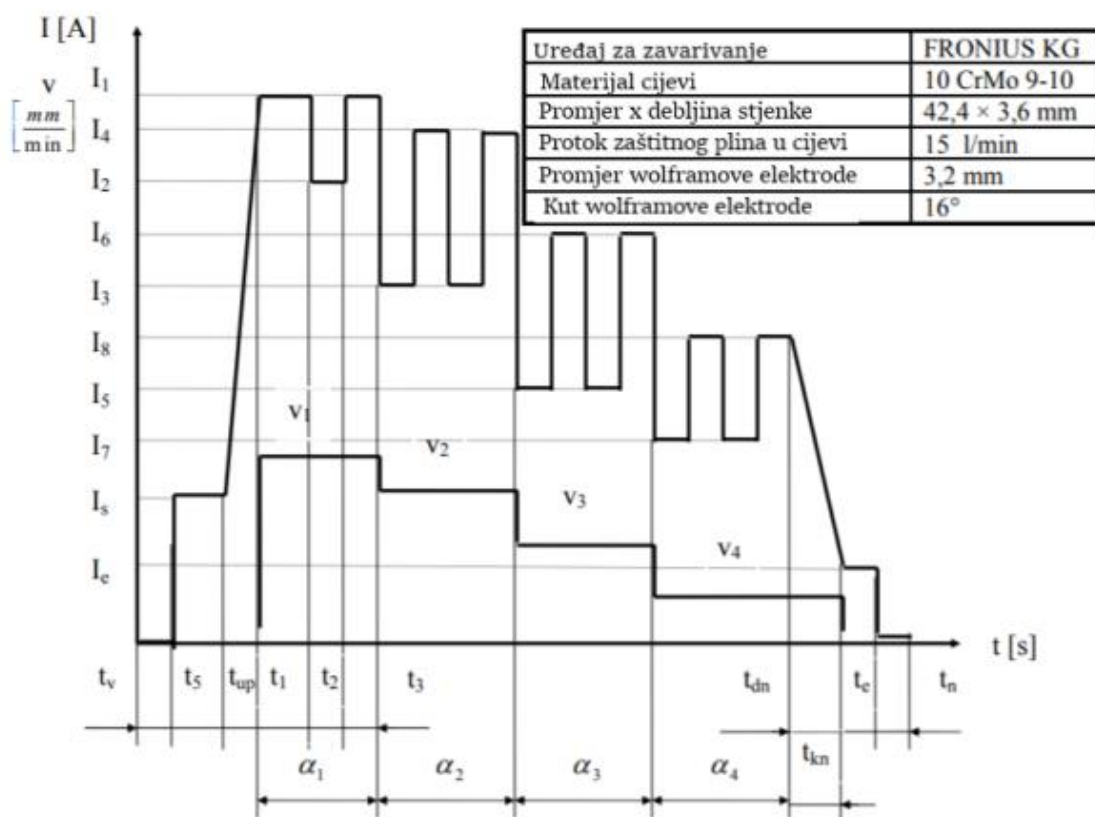
**Slika 17: Automatski postupak TIG zavarivanja s okretanjem cijevi [20]**

Automatski postupak TIG zavarivanja s okretanjem cijevi i nepomičnom zavarivačkom glavom rezultira vrlo visokom učinkovitošću i kvalitetom u proizvodnji standardnih cijevnih elemenata postrojenja parnih kotlova. Nakon zavarivanja, cijevi se režu na određenu duljinu, a zatim se savijaju na CNC savijačici kako bi poprimile traženi oblik.

Struja zavarivanja i brzina zavarivanja podijeljeni su u 4 sektora oko cijevi. Glavni parametri TIG zavarivanja cijevi u jednom prolazu s mirujućom glavom i primjer programiranja stroja prikazani su u nastavku u tablici 4 i na slici 18:

**Tablica 4: Parametri postupka TIG zavarivanja s okretanjem cijevi**

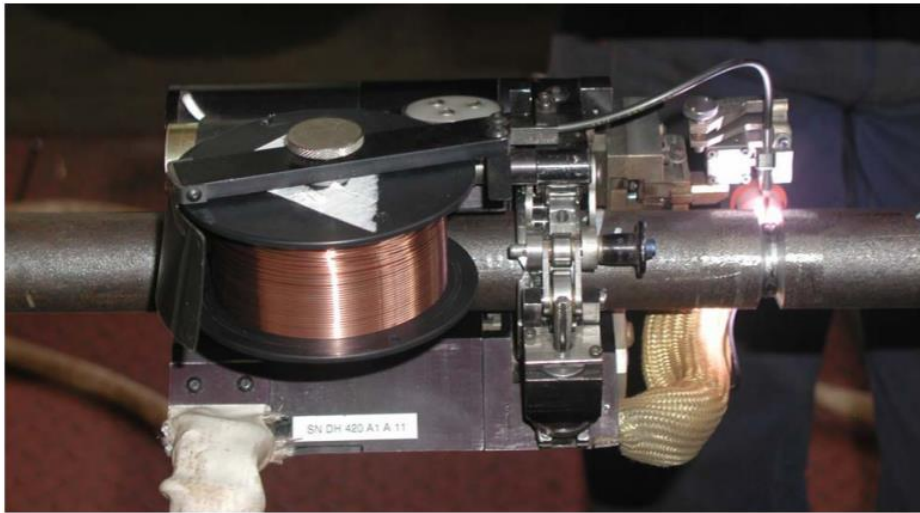
Promatrana veličina		Prije zavarivanja		Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4		završetak
Struja [A]	Struja zagrijavanja	$I_s = 125$	Impulsna struja [A]	$I_1 = 128$	$I_3 = 126$	$I_5 = 124$	$I_7 = 119$	Struja na kraju	$I_e = 2$
	-	-	Pozadinska struja [A]	$I_2 = 42$	$I_4 = 40$	$I_6 = 38$	$I_8 = 36$	-	-
Vrijeme [s]	protok plina prije zavarivanja	$t_v = 5$	impuls	$t_1 = 0,3$	-	-	-	smanjenje struje	$t_{dn} = 12$
	paljenje luka	$t_s = 6$	struja pozadinskog impulsa	$t_2 = 0,3$	-	-	-	struja završnog impulsa	$t_e = 0,5$
	pojačavanje struje	$t_{up} = 1$	impulsna struja	$t_3 = 0,3$	-	-	-	Protok nakon zavarivanja	$t_n = 5$
Kut [°]	-	-	Kut zavarene cijevi	$\alpha_1 = 48$	$\alpha_2 = 145$	$\alpha_3 = 270$	$\alpha_4 = 370$	-	-
Brzina	-	-	Žica	$v_1 = 22$ cm/min	$v_2 = 21$ cm/min	$v_3 = 19$ cm/min	$v_4 = 18$ cm/min	Okretanje cijevi	$v_\alpha = 0,3$ min <sup>-1</sup>



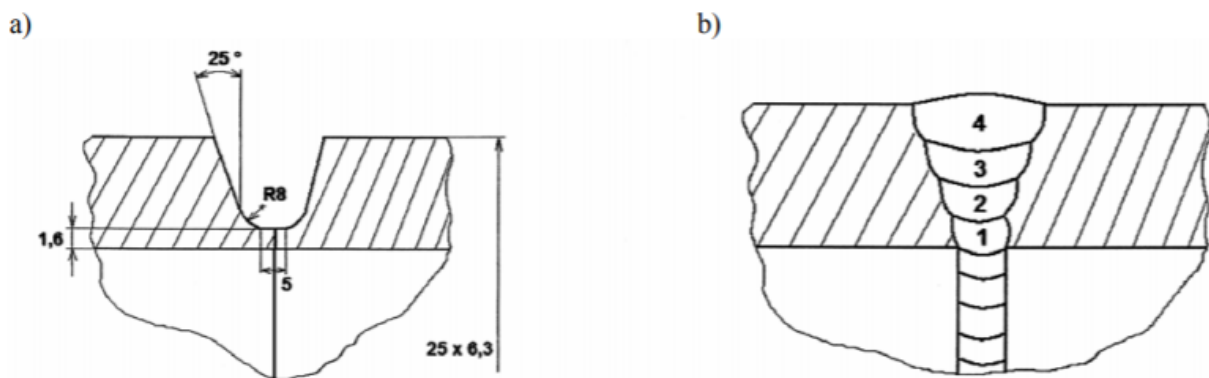
**Slika 18: Parametri postupka TIG zavarivanja s okretanjem cijevi [20]**



Automatsko orbitalno TIG zavarivanje, kada se zavarivačka glava rotira tijekom zavarivanja, a cijevi su nepomične, karakterizira visoka učinkovitost, kvaliteta i mobilnost postupka zavarivanja čime se postiže u cijelosti automatizirana proizvodna linija. Uz pažljivu primjenu, ovaj se postupak zavarivanja vrši u višestrukim prolazima s dodatkom dodatnog materijala, zbog veće debljine stijenke cijevi. Priprema spoja se vrši posebnim odgovarajućim alatom, neposredno prije zavarivanja.



**Slika 19: Automatsko orbitalno TIG zavarivanje s nepomičnim cijevima [20]**



**Slika 20: Priprema zavora (a) i raspored prolaza zavarivanja (b) [20]**

Ovaj postupak zavarivanja je vrlo učinkovit kada se postavi u proizvodnu zavarivačku liniju, a ako se pojedinačno koristi, ručni TIG postupak zavarivanja može biti ekonomičniji, zbog relativno dugog vremena pripreme za orbitalno zavarivanje, ali kvaliteta zavarenih spojeva i ponovljivost zavarivanja je bez sumnje bolja. Proizvođač opreme za zavarivanje razvio je širok raspon različitih orbitalnih TIG uređaja, a posebno je zanimljiva orbitalna TIG oprema za zavarivanje s uskim prorezom, pogodna za zavarivanje dijelova blok komore.

Parametri zavarivanja za orbitalno TIG zavarivanje su podijeljeni na 6 sektora prema slici 21. U nastavku su prikazani parametri zavarivanja za svaki sektor i prolaz tijekom zavarivanja orbitalnim TIG zavarivanjem na slici 22.



**Slika 21: Podjela na sektore kod orbitalnog TIG zavarivanja [20]**

Parametar	Prolaz/ sektor	Prolaz 1						Prolaz 2						Prolaz 3									
		S/T	1	2	3	4	5	6	S/T	1	2	3	4	5	6	S/T	1	2	3	4	5	6	
$I_p$ (A)		115	108	109	112	112	112	125	124	123	122	121	121	145	144	143	142	141	141	141	141	141	141
$V_z$ (cm/min)		50	50	50	50	50	50	76	76	76	76	76	76	90	100	100	100	100	100	100	100	100	90
$v$ (cm/min)		12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
$K_{dl}$ (mm)		1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
$v_o$ (s)								0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$A$ (cm/OFF)	N/A	N/A						N/A	0.49	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	N/A	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{o1}$ (S)		N/A						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	
$T_{o2}$ (S)		N/A						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	
KDL (ON/OFF)		ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
$I_{Nn}$ (%)		50	50	50	50	50	50	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
$T_{Nv}$ (s)		0.45	0.45	0.45	0.45	0.35	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$T_{Nn}$ (s)		0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
F(P) (%/OFF)		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
F(Pž) (%/OFF)		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

$I_p$  ... Struja kod svakog prolaza

$V_z$  ... Protok žice

$v$  ... Brzina rotacije

$K_{dl}$  ... Kontrola duljine

$v_o$  ... Brzina oscilacije preko spoja

$A$  ... Amplituda oscilacije (weave width)

$T_{o1}$  ... Vremensko razdoblje zadržavanja oscilacija

$t_{o2}$  ... Vremensko razdoblje va oscilacija

KDL ... Funkcija kontrole duljine luka

$I_{Nn}$  ... Struja niskog napona

$T_{Nv}$  ... Vrijeme struje visokog napona

$T_{Nn}$  ... Vrijeme struje niskog napona

F(P) ... Funkcija puta

F(Pž) ... Funkcija protoka žice

**Slika 22: Parametri automatskog orbitalnog TIG zavarivanja s nepomičnim cijevima [20]**

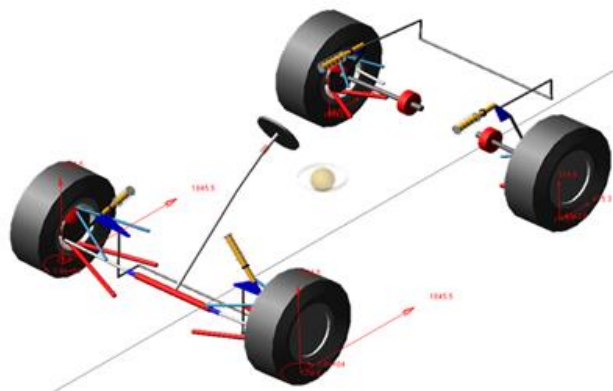
## 5 Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada definirana je tehnologija zavarivanja i opseg ispitivanja svojstava zavara u svrhu izrade ovjesnih elemenata za bolid Formule student. Formula student je internacionalno inženjersko studentsko natjecanje čiji je cilj upotpuniti znanje i iskustvo studenata kroz projektiranje i izradu bolida. Ovo se natjecanje održava u mnogim zemljama širom svijeta, a cilj je kroz mnoge statičke i dinamičke discipline pokazati znanje i inženjerski pristup u konstrukciji bolida i primijeniti već stečeno inženjersko znanje. FSB Racing team je dio udruge Hrvatske studentske asocijacije strojarskih fakulteta, aktivno djeluje od 2004. godine s ciljem izrade bolida i sudjelovanja na natjecanjima Formule student.

U projektima razvoja vozila jedan od najzahtjevnijih zadataka je projektiranje ovjesa vozila, zbog složenosti sustava ovjesa i postojanja mnogih utjecajnih parametara čiji su utjecaji na kinematiku ovjesa i dinamiku cijelog vozila međusobno isprepleteni. Glavna zadaća ovjesa je osigurati neprekinuti kontakt kotača (gume) s podlogom jer je samo u tom slučaju moguće u svakoj situaciji ostvariti ubrzanje, usporenje ili skretanje vozila. Ovjes mora omogućiti da sile koje se javljaju na mjestu kontakta kotača i podloge, a prenose se preko komponenata ovjesa, amortizera i opruga, imaju što manji utjecaj na ostatak vozila, a posebno na vozača i druge putnike u vozilu. [21]

### 5.1 Ulazni podaci

Ulazni podaci za proračun dijelova ovjesa pa tako i cijevi koje se zavaruju dobiveni su iz programa Adams Car. Kod proračuna vilica i ostalih elemenata uzeta su u obzir 4 različita slučaja: [22]



**Slika 23: Kinematički model vozila**

1. Opterećenje maksimalnom silom na mjestu spoja sa sklopom kotača koja je dobivena kao rezultanta maksimalnih komponenta bez obzira na trenutak simulacije u kojima se javljaju. Na mjestu spoja s monokokom postavljeni su nepomični oslonci, a oslonac na mjestu prihвата opruge postavljen je u smjeru osi z. Zanemaren je utjecaj sile amortizera.
2. Opterećenje maksimalnom silom na mjestu spoja sa sklopom kotača koja je dobivena kao rezultanta realnih komponenta. Nepomični oslonci postavljeni su na mjestu spoja s monokokom, a oslonac na mjestu prihвата opruge u smjeru osi z. Zanemaren je utjecaj sile amortizera.
3. Krajnji slučaj opterećenja opruge: sila od 3000 N na mjestu hvatišta opruge u smjeru osi z, sila od 3000 N (bump-stop) na mjestu hvatišta amortizera u smjeru osi amortizera, nepomični oslonci na mjestu spoja s monokokom, oslonac na mjestu spoja s sklopom kotača u smjeru osi z.
4. Realan slučaj opterećenja opruge: sila od 1500 N na mjestu hvatišta opruge u smjeru osi z, sila od 1500 N (bump-stop) na mjestu hvatišta amortizera u smjeru osi amortizera, nepomični oslonci na mjestu spoja s monokokom, oslonac na mjestu spoja sa sklopom kotača u smjeru osi z.

U nastavku je na slici 24 prikazan konačni sklop prednjeg i stražnjeg ovjesa:



**Slika 24: Prikaz ovjesa- prednji (lijevo) istražnji (desno)**

Kod odabira cijevi za ispitivanje svojstava zavara uzete su cijevi najmanjih dimenzija i debljine stijenke. Razlog je taj što je najveći problem odrediti parametre zavarivanja za tankostijene cijevi zbog potencijalno prevelikog unosa topline.

## 5.2 Razrada postupka zavarivanja

U nastavku je ukratko opisan postupak odabira tehnologije zavarivanja i pripreme dokumentacije prije same izrade ispitnih uzoraka.

### 5.2.1 Odabir materijala za zavarivanje

Za izradu cijevi ovjesa i kućišta na jednoj strani odabran je materijal 25CrMo4, a za kućišta na drugoj strani koja se također zavaruju na cijevi odabran je materijal 42CrMo4.

U nastavku je na slici 25 prikazan atest za cijevi materijala 25CrMo4 korištenih u izradi ispitnih uzoraka.

TRA FIL TUBI S.r.l.		COMPANY WITH QUALITY SYSTEM CERTIFIED BY DNV GL = ISO 9001:2015 =						
TUBI DI ACCIAIO TRAFILATI A FREDDO 20090 NOVIGORO DI SEGRATE ( MILANO ) Via A. CORELLI, 180 - Tel: 02/9020000 R.A. - FAX 02/7962251 R.E.A. 492541 - IP MECC. MI 047171 - CAP. SOC. 101.000 COD. FISC. e P. IVA 00845910157 - REGISTRO IMPIESE 97178								
<b>CERTIFICATO DI COLLAUDO</b>								
TESTING CERTIFICATE - CERTIFICAT D'ESSAIS (EN 10204 (2004-3.1))								
Spett.le <b>HSA-SF</b>		N° <b>C19-00219</b> Sub						
Messrs <b>UITVANA LUCICA</b>		del <b>25/02/2019</b>						
Messieurs <b>10000 ZAGABRIA</b>		of/de						
		<b>CROAZIA</b>						
Vs. Ordine n° <b>E MAIL</b>		Ns. Conferma n° <b>0000111</b>						
Your Order n°		Our Confirmation n°						
Votre Commande n°		Notre Confirmation n°						
del <b>13/02/2019</b>		del <b>13/02/2019</b>						
of/de		of/de						
Spedizione (DdT n°) <b>0000136</b>		Ns. Commessa n° <b>A190199/0</b>						
Delivery (DdT n°)		Our Order n°						
Expédition (DdT n°)		Notre Commande n°						
del <b>25/02/2019</b>		Quantità <b>3,00</b> Kg						
of/de		Quantity <b>5,00</b> Metro/Htr						
		Quantité <b>5</b> M/Pcs						
Dimensioni tubo (mm) <b>18,00x1,50 mm (Ø Int. 15,00 mm)</b>		Stato fornitura <b>stress relieved,</b>						
Pipe Dimension		Delivery condition						
Dimension du tube		état de livraison						
Qualità acciaio <b>25CrMo4</b>		Norma <b>(EN 10305-1:2016)</b>						
Steel grade		Standard						
Nuance		Specification						
CARATTERISTICHE MECCANICHE								
MECHANICAL PROPERTIES - CARACTERISTIQUES MECANIQUES								
Pos / Item	Provetta Specimen Etalon		Snervamento Yield point Limite d'élasticité	Carico di Rottura Tensile strength Résistance à la traction		Allungamento Elongation Allongement	Durezza Hardness Dureté	
	Sezione (mm <sup>2</sup> )	Lo (mm)	Rp (0,2) (N/mm <sup>2</sup> )	Totale/Total (N)	Unitario/Unitary (N/mm <sup>2</sup> )	(%)	HRB Min. Max	
A	77,62	50	575	50431	650	25,00	0 0	
Prove di Allargatura Flaring test / essai d'évasement			Vedi note / See notes			Notes		
Prove di Bordatura Border test / test de bordure			Vedi note / See notes			The tests done are the ones required by the standards or client's specifications.		
Prove di Schiaccio Flattening test / essai d'aplatissement			Vedi note / See notes			Visual and Dimensional Test OK		
Controllo correnti parassite Eddy currents test			Vedi note / See notes					
N° Colata Heat / Couée		ANALISI CHIMICA						
270761		CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE						
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)		
0,230	0,710	0,270	0,007	0,008	1,020	0,150		
I DATI RIPORTATI NELL'ANALISI CHIMICA RISPESCHIANO INTEGRALMENTE QUANTO RIPORTATO NEL CERTIFICATO DI COLLAUDO RILASCIATO DAL FORNITORE DELLA MATERIA PRIMA. The data reported in chemical analysis are in accordance with the test certificate issued by the raw material supplier. We declare that the data reported in the certificate are in compliance with the order specifications. The Trafiflubi quality system is in accordance to Annex L, section 4.3 of Directive PED 2014/68/EU - Certificate n° 1627-12-CE-ITA-DNV. Approved acc. to AD 2009-Merblatt WD by the Notified Body for Pressure Equipment of TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG (notified body, reg.no.: 0045). I campioni delle prove sono a disposizione del Cliente per un anno. The test specimens are at the disposal of the Client for one year. Prove meccaniche effettuate a temperatura ambiente Mechanical tests made at ambient temperature 08-05 1(15) Certificato di collaudo rev.6								
				 Resp. Ufficio Tecnico		 Trafiflubi srl Amministratore Unico Federico Sale		

Slika 25: Atest 25CrMo4 18 mm x 1,5 mm

### 5.2.2 Odabir postupka zavarivanja

Najbolja iskustva kod zavarivanja tankostijenih cijevi postignuta su sa TIG postupkom zavarivanja zbog vrlo dobre kontrole unosa topline (istosmjerni izvor struje gdje je elektroda spojena na minus pol). Ovaj postupak zavarivanja se prema normi HRN EN ISO 4063 označava s brojem 141. Parametre električnog luka postavljeni su prema debljini stijenke: 1 A za 0,0254 mm debljine stijenke što iznosi 100A za stijenku 2,54 mm ili u našem slučaju 60 A za stijenku 1,5 mm. Ipak, ova je vrijednost samo smjernica, a stvarni iznos jakosti struje određuje sam zavarivač. Jakost struje djelomično ovisi o sposobnosti, iskustvu i vještinama samog zavarivača. Zato je kod izrade dokumentacije o specifikaciji postupka zavarivanja poželjno, a u pojedinim slučajevima i obvezno, da zavarivanje ispitnih uzoraka i stvarnih dijelova vrši isti zavarivač kako bi se mogla garantirati dobivena svojstva i kvaliteta zavara. U našem slučaju odabrana je vrijednost jakosti struje 30-50 A za čeonu spoj cijevi sa cijevi (uzorak A) te 50-70 A za čeonu spoj cijevi sa šipkom (uzorak B).

### 5.2.3 Izvor struje

Za zavarivanje uzoraka, a kasnije i stvarnih dijelova korišten je izvor struje MasterTig MLS3003ACDC tvrtke Kemppi prikazan na slici 26 u nastavku. U tablici 5 u nastavku prikazane su osnovne specifikacije korištenog izvora struje.



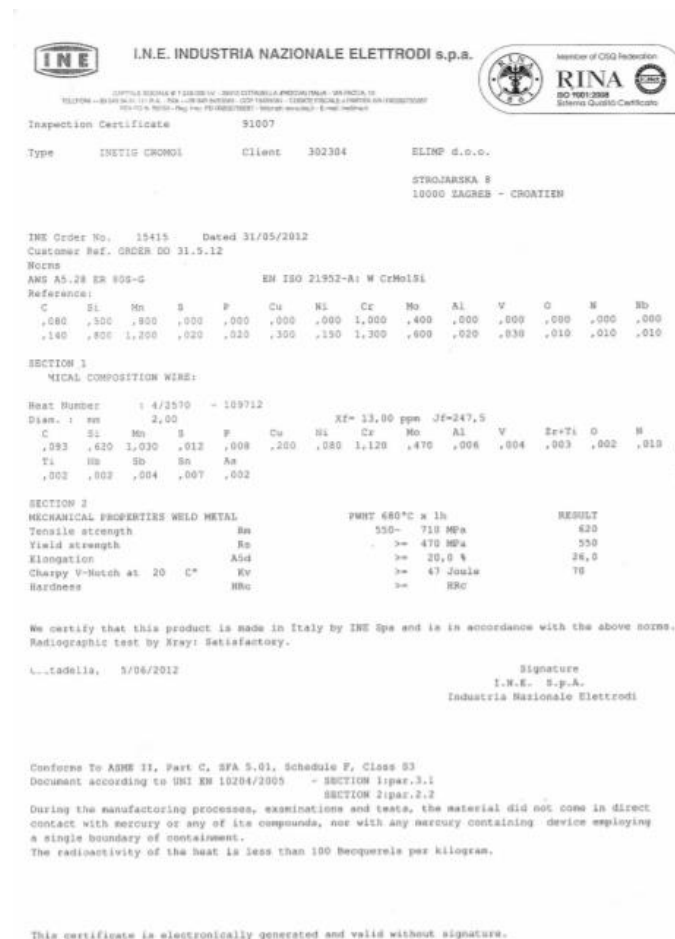
**Slika 26: MasterTig MLS3003 ACDC**

**Tablica 5: Tehničke specifikacije izvora struje MLS 3030 ACDC**

Raspon struje za TIG [A]	3-300
Raspon napona za TIG [V]	10-22
Struja otvorenog kruga [V]	58
Izvor spajanja [V], frekvencija [Hz]	230-460, 50-60
Dimenzije [mm]	500 x 180 x 290
Masa [kg]	25

### 5.2.4 Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za zavarivanje odabran je materijal oznake AWS A5.28: ER80S-G. U nastavku je prikazan atest dodatnog materijala na slici 27.

**Slika 27: Atest dodatnog materijala AWS A5.28: ER80S-G, 2mm**

### 5.2.5 Odabir zaštitnog plina

U svrhu zavarivanja potreban je plin argon I2 prema HRN EN ISO 14175:2008. Za zavarivanje je korišten plin stupnja čistoće 4.6 (99,996% argona) zbog velike razlike u cijeni između kvaliteta 4.6, 4.8 i 5.0, jer je 4.6 zadovoljavajući stupanj čistoće za tražene zahtjeve u kvaliteti zavara. Protočna količina zaštitnog plina koja se koristi je 12-14 l/min. Više plina u pravilu nije bolje jer bi se kod većeg protoka plina formiralo turbulentno strujanje i uvelo atmosferski zrak u zavar. Obvezno je propuhivanje plina i kroz cijev (ispitni uzorak A) zbog potrebne kvalitete korijena zavara. U tu svrhu koristi se protok plina od 3-5 l/min. Prije uspostavljanja luka zaštitni plin mora strujati 0,4-0,6 s kako bi se pištolj i okoliš zavara očistili od atmosferskog zraka i 10-15 s nakon gašenja luka kako bi se spriječila oksidacija još neohlađenog zavara i ZUT-a.

### 5.2.6 Predgrijavanje

U nastavku je proveden proračun da bi se provjerilo je li potrebno predgrijavanje cijevi od materijala 25CrMo4. Za proračun su korišteni podaci iz atesta pripadajućeg materijala. Predgrijavanje se vrši prema normi HRN EN ISO 1011-2, metoda B: [22]

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5)$$

$$T_{pCET} = 750 \times CET - 150 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ [%]} \quad (6)$$

$$CET = 0,23 + \frac{0,71 + 0,15}{10} + \frac{1,02 + 0}{20} + \frac{0}{40} \text{ [%]}$$

$$CET = 0,367 \text{ [%]}$$

$$T_{pCET} = 750 \times 0,367 - 150 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

$$T_{pCET} = 125,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{pd} = 160 \times \tan h\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

$$T_{pd} = 160 \times \tan h\left(\frac{1,5}{35}\right) - 110 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{pd} = -103,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$



$$T_{pHD} = 62 \times HD^{0,35} - 100, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$T_{pHD} = 62 \times 4^{0,35} - 100, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{pHD} = 0,7 \text{ } [^\circ\text{C}]$$

$$T_{pQ} = (53 \times CET - 32) \times Q - 53 \times CET + 32, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} \text{ } [kJ/mm] \quad (10)$$

$$Q = 0,6 \times \frac{9 \times 50}{100} \times \frac{60}{1000} \text{ } [kJ/mm]$$

$$Q = 0,27 \text{ } [kJ/mm]$$

$$T_{pQ} = (53 \times 0,285 - 32) \times 0,27 - 53 \times 0,285 + 32, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{pQ} = 12,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (11)$$

$$T_p = 125,25 - 103,1 + 0,7 + 12,3 \text{ } [^\circ\text{C}]$$

$$T_p = 35,15 \text{ } [^\circ\text{C}]$$

Gdje su:

$T_p$  – temperatura predgrijavanja [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{pCET}$  – Temperatura predgrijavanja u funkciji ekvivalenta ugljika [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{pd}$  – temperatura predgrijavanja u funkciji debljine osnovnog materijala [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{pHD}$  – temperaturapredgrijavanja u funkciji sadržaja vodika u metalu zavara [ $^\circ\text{C}$ ]


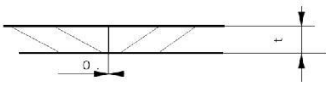
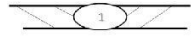
$T_{pQ}$  – temperatura predgrijavanja u funkciji unosa topline [ $^\circ\text{C}$ ]

$Q$  – unos topline pri zavarivanju [kJ/mm]

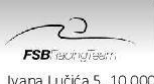
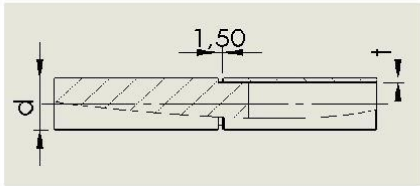

Predgrijavanje nije potrebno, a ukoliko je temperatura materijala niža od 15 do 20 $^\circ\text{C}$  predgrijavanje se vrši plinskim plamenikom na 150 $^\circ\text{C}$  jer bi se u suprotnom metal prebrzo hladio i postao bi krhak. Zavarivanje hladnog materijala može prouzročiti i vodikove pukotine pa je to još jedan razlog predgrijavanja kada je hladno.

## 5.2.7 Specifikacija postupka zavarivanja

Specifikacija postupka zavarivanja izrađuje se prema normi HRN EN ISO 15609-1. U nastavku su prikazani dokumenti specifikacije postupka zavarivanja za ovjes bolida Formule student u kojima su prikazani svi podaci važni za sam postupak zavarivanja ovjesa na slikama 28 i 29.

 Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb		<b>UPUTA ZA ZAVARIVANJE (WPS)</b> SCHWEISSANWEISUNG (WPS) WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Dok. Br. / Doc. Nr. / No. <b>OR02-18-1.5-5.1</b> List/Seite/Sheet: 1/1			
Naručitelj/Kunde/Customer: <b>HSA-SF, FSB Racing Team</b> Projekt/Projekt/Project: <b>Kvalifikacija postupka zavarivanja</b>		Norma/Norm/Standard: <b>EN ISO 15609-1 / EN ISO 15614-1</b>							
Osnovni materijal/Grundwerkstoff/Base material Šarža br./Schmelze Nr./Heat No.: <b>270761</b>		Atest. br./Inspection Certificate No./ Abnahmeprüfzeugnis Nr.: <b>141736</b> <b>EN 10204 3.1/ DIN11866 / EN 10217-7 TC2 H3o</b> <b>AD 2000 W2 BN2 ASTM A270 W2.Rb</b>							
Postupak zavarivanja/Schweißproceß/Welding process(es): <b>ISO 4063 - 141 (TIG)</b>		Tipovi /Methode/Type(s): <b>meh. / orbital welding</b>							
Položaj zavarivanja/Schweißposition/Welding position: <b>ISO 6947:2011</b>		<b>meh. / orbital welding</b>							
Osnovni materijal/Grundwerkstoff/Base material <b>EN 10217-7/DIN 11866 sa/mit/with EN 10217-7/DIN 11866</b>		Oznaka materijala/Bezeichnung/Specification type and grade: <b>W.Nr. 1.7219 sa/mit/with W.Nr. 1.7219</b> <b>25CrMo4 sa/mit/with 25CrMo4</b>							
Grupa materijala/Werkstoffgruppe/Parent mat. group <b>ISO/TR 15608:2018 5.1 sa/mit/with 5.1</b>									
Dodatni materijal/Zusatzwerkstoffe/Filler mat. type: <b>žica</b>		<b>EN ISO 21952-A:</b>		Tip obloge/Umhülungs tip/Coat type: <b>+</b>					
Oznaka po standardu/Norm Bezeich./Standard desig: <b>AWS A5.28 ER 80S - G</b>		<b>CrMo1Si</b>		Promjer/Abmessung/Size (mm): <b>2, 0</b>					
Trgovački naziv/Markenbezeichnung/Trade name:				Prašak/Sweißpulver/Welding flux: <b>+</b>					
<b>Predgrijavanje/Worwärmer/Preheat:</b> Predgrijavanje/Vorwärme./Preheat temp. (min. °C): <b>20</b> Međuslojna / Zwischenlagen./Interpass temp. (max °C): <b>+</b> Način predgrijanja/Wärmemethode/ Preheat treatment: <b>+</b> Kontrola temp. predgrijanja/ Temp.Überwachung/Temp. Control: <b>+</b>				<b>Toplinska obrada Wärmebehandlung/Heattreatment:</b> Raspon temp. / Temp.bereich/Temp. range(°C): <b>+</b> Vrijeme držanja/Haltezeit/Time range (h, min): <b>+</b> Ugrijavanje/Warmen/Heating (°C/h): <b>+</b> Ohladivanje/Abkühlung/Cooling(°C/h): <b>+</b>					
Oblik spoja/Gestaltung der Verbindung/Groove design: <b>EN ISO 9692-1:2013 + EN ISO 1708-1:2010</b>				Redoslijed zavarivanja/Schweißfolge/Sketch of run sequence:					
									
Sloj broj Schweißraupe Pass No	Postupak zavar. Schweißproceß Welding process:	Dodatni materijal Zusatzwerkstoff Filler material	Promjer DM Durchmeßer.ZW Filler mat. diam.	Vrsta struje Strompolung Current polar.	Raspon struje Amperebereich Current Range	Napon raspon Spannungsber. Voltage range:	Brzina žice Drathvorshub. Wire speed	Protok plina. Gasdurchflußm Gas flow rate l/min	Unos topline Wärmeinbrin. Heat input kJ/mm
1	142 (TIG)	+	+	DC (-)	30 - 50	8 - 9	+	12 ± 13	< 1,5
Vrsta spoja/Nahtart/Join type: <b>EN ISO 9606-1:2017 BW</b>				Zašt. Plin norma/Schutzgas Norm/Shielding gas standard: <b>EN ISO 14175</b>					
				Zaštitni plin/Schutzgas/Shielding gas: <b>I1-Ar</b>					
Osnovni materijal/ Grundwerkstoff/Base mat.		<b>t = 1,5 mm</b>		Količina protoka/Durchflussmenge/Flow rate(l/min): <b>12 ± 14</b>					
				Zaštita korijena/Wurzelschutzgas/Gas backing: <b>I1-Ar</b>					
Korijen/Würzel/Root:		<b>+</b>		Količina protoka/Durchflussmenge/Flow rate(l/min): <b>3 - 5</b>					
				Tehnika rada/Schweißmethode/Welding technique: <b>bez njihanja</b>					
Popuna-pokrovni/ Fuell-Decklage/ Filler-Finall		<b>+</b>		Maksimalna širina gusjenice/ Max.Schweißraupenbreite/Max.Layer width:		<b>+</b>			
Promjer / Rohrdurchmeß / Pipe diameter:		<b>18 mm</b>		Prethodno i međuslojno čišćenje/ Vor-, und Zwischenlagenreinigung/ Clean. initial and interpass		<b>strojno rezanje i čišćenje industrijskim alkoholom</b>			
Napomena / Bemerkung / Remark: Popratni dokument ovom pWPS-u je ispis svih prednamještenih parametara za zavarivanje postavljenih za zavarivanje ispitnih uzoraka i programiranjem izvora struje za orbitalno zavarivanje ORBIMAT 165CA, zatvorena glava za zavarivanje OW 76S.									
Izradio/Erstellt/Prepared by: Matija Levatić				Nadzor/Prüfstelle/Inspection:				Ident. Oznaka: <b>FS-02-pWPS</b>	
Datum/Date: 18. 5. 2019.				Datum/Date:				Izmjena br./Rev. No. <b>0</b>	

**Slika 28: Specifikacija postupka zavarivanja- uzorak A**

 Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb		<b>UPUTA ZA ZAVARIVANJE (WPS)</b> SCHWEISSANWEISUNG (WPS) WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Dok. Br. / Doc. Nr. / No. <b>OR02-18-1.5-5.1,5.1</b>			
Naručitelj/Kunde/Customer: <b>HSA-SF, FSB Racing Team</b>		Norma/Norm/Standard: <b>EN ISO 15609-1 / EN ISO 15614-1</b>				List/Seite/Sheet: 1/1			
Projekt/Projekt/Project: <b>Kvalifikacija postupka zavarivanja</b>		Objekt/Benennung/Object: <b>EN 3834 2</b>		Osnovni materijal/Grundwerkstoff/Base material Šarža br./Schmelze Nr./Heat No.: <b>270761</b>		Atest. br./Inspection Certificate No./ Abnahmeprüfzeugnis Nr.: <b>141736</b> <b>EN 10204 3.1/ DIN11866 / EN 10217-7 TC2 H3o</b> <b>AD 2000 W2 BN2 ASTM A270 W2Rb</b>			
Postupak zavarivanja/Schweißproceß/Welding process(es): <b>ISO 4063 - 141 (TIG)</b>		Tipovi/Method/Type(s): <b>meh. / orbital welding</b>		Položaj zavarivanja/Schweißposition/Welding position: <b>ISO 6947:2011</b>					
Osnovni materijal/Grundwerkstoff/Base material <b>EN 10217-7/DIN 11866 sa/mit/with EN 10217-7/DIN 11866</b>		Oznaka materijala/Bezeichnung/Specification type and grade: <b>W.Nr. 1.7129 sa/mit/with W.Nr.1.7129</b> <b>25CrMo4 sa/mit/with 42CrMo4</b>		Grupa materijala/Werkstoffgruppe/Parent mat. group <b>ISO/TR 15608:2018 5.1 sa/mit/with 5.1</b>					
Dodatni materijal/Zusatzwerkstoffe/Filler mat. type: <b>žica</b>		Tip obloge/Umhülungs tip/Coat type: <b>÷</b>		Oznaka po standardu/Norm Bezeich./Standard desig: <b>AWS A5.28 ER 80S - G</b>		Promjer/Abmessung/Size (mm): <b>2, 0</b>			
Trgovački naziv/Markenbezeichnung/Trade name: <b>CrMo1Si</b>		Prašak/Sweißpulver/Welding flux: <b>÷</b>		Predgrijavanje/Worwärmer/Preheat: Predgrijavanje/Vorwärme./Preheat temp. (min. °C): <b>20</b>		Toplinska obrada/Wärmebehandlung/Heatteratment: Raspon temp. /Temp.bereich/Temp. range(°C): <b>÷</b>			
Međuslojna / Zwischenlagen./Interpass temp. (max °C): <b>÷</b>		Način predgrijanja/Wärmemethode/ Preheat treatment: <b>÷</b>		Vrijeme držanja/Haltezeit/Time range (h, min): <b>÷</b>		Ugrijavanje/Warmen/Heating (°C/h): <b>÷</b>			
Kontrola temp. predgrijanja/ Temp.Überwachung/Temp. Control: <b>÷</b>		Oblik spoja/Gestaltung der Verbindung/Groove design: <b>EN ISO 9692-1:2013 + EN ISO 1708-1:2010</b>		Redoslijed zavarivanja/Schweißfolge/Sketch of run sequence: 					
Sloj broj Schweißraupe Pass No	Postupak zavar. Schweißproceß Welding process:	Dodatni materijal Zusatzwerkstoff Filler material	Promjer DM Durchmeßer ZW Filler mat. diam.	Vrsta struje Strompolumg Current polar.	Raspon struje Amperebereich Current Range	Napon raspon Spannungsber. Voltage range:	Brzina žice Drathvorshub. Wire speed	Protok plina. Gassdurchflußm Gas flow rate l/min	Unos topline Wärmeinbrin. Heat input kJ/mm
1	142 (TIG)	÷	÷	DC (-)	70-90	9 - 10	÷	12 ± 13	<1,5
Vrsta spoja/Nahtart/Joint type: <b>EN ISO 9606-1:2017 BW</b>				Zašt. Plin norma/Schutzgas Norm/Shielding gas standard: <b>EN ISO 14175</b>					
Osnovni materijal/ Grundwerkstoff/Base mat.				t = 1,5 mm		Zaštitni plin/Schutzgas/Shielding gas: <b>I1-Ar</b>		Količina protoka/Durchflussmenge/Flow rate(l/min): <b>12 + 14</b>	
Korijen/Würzel/Root:				÷		Zaštita korijena/Würzelschutzgas/Gas backing: <b>I1-Ar</b>		Količina protoka/Durchflussmenge/Flow rate(l/min): <b>3 - 5</b>	
Popuna-pokrovni/ Fuell-Decklage/ Filler-Finall				÷		Tehnika rada/Schweißmethode/Welding technique: <b>bez njihanja</b>		Maksimalna širina gusjenice/ Max.Schweißraupenbreite/Max.layer width: <b>÷</b>	
Promjer / Rohrdurchmeß / Pipe diameter:				18 mm		Prethodno i međuslojno čišćenje/ Vor-, und Zwischenlagenreinigung/ Clean. initial and interpass		<b>strojno rezanje i čišćenje industrijskim alkoholom</b>	
Napomena / Bemerkung / Remark: Popratni dokument ovom pWPS-u je ispis svih prednamještenih parametara za zavarivanje postavljenih za zavarivanje ispitnih uzoraka i programiranjem izvora struje za orbitalno zavarivanje ORBIMAT 165CA, zatvorena glava za zavarivanje OW 76S.									
Izradio/Erstellt/Prepared by: Matj Levatić				Nadzor/Prüfstelle/Inspection: Datum/Date: 18. 5. 2019.				Ident. Oznaka: <b>FS-02-pWPS</b>	
								Izmjena br./Rev. No. <b>0</b>	

Slika 29: Specifikacija postupka zavarivanja- uzorak B

### 5.3 Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka

Nakon pripreme dokumenta specifikacije postupka zavarivanja prelazi se na izradu ispitnih uzoraka. Jedini dodatni zahtjev na ispitne uzorke je da ukupna duljina uzorka bude otprilike 300 mm zbog ispitivanja na kidalici. Iz tog razloga za oba se uzorka režu cijevi na duljinu od 150 mm, a na šipki promjera 18 mm od materijala 42CrMo4 se tokari suženje na promjer od 15 mm duljine 15 mm. Nakon rezanja i tokarenja cijevi potrebno je odstraniti oštre bridove, zatim pobrusiti područje od otprilike 20 mm od mjesta zavora i očistiti ga industrijskim alkoholom. Nakon navedene pripreme cijevi i šipke, dijelovi su spremni na izradu ispitnih uzoraka uz poštovanje svih uputa iz specifikacije postupka zavarivanja. Ispitni uzorci nakon zavarivanja prikazani su u nastavku.

#### 5.3.1 Rezultati ispitivanja

Na ispitnim uzorcima vršena su sljedeća ispitivanja: od nerazornih ispitivanja radiografsko ispitivanje, a od razornih ispitivanja statički vlačni pokus, izrada i analiza makroizbruska i mjerenje tvrdoće po presjeku zavora.

#### 5.3.2 Ispitivanje radiografijom

Ispitivanje radiografijom provedeno je u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, a vršeno je samo na ispitnim uzorcima A (spoj cijevi i cijevi materijala 25CrMo4), te su uzeta 2 različita uzorka oznaka 1 i 2. Za provođenje ispitivanja radiografijom korištena je sljedeća oprema:

RTG uređaj - Balteau 300 D,

Skener - VMI 5100,

Slikovna ploča - Kodak industreflex Blue



**Slika 30: Upravljačka jedinica RTG uređaja- Balteau 300 D**

Korišteni parametri su 150 Kw, 4 mA i vrijeme 2 minute 45 sekundi.

Parametri skeniranja:

Napon lasera - 15 V,

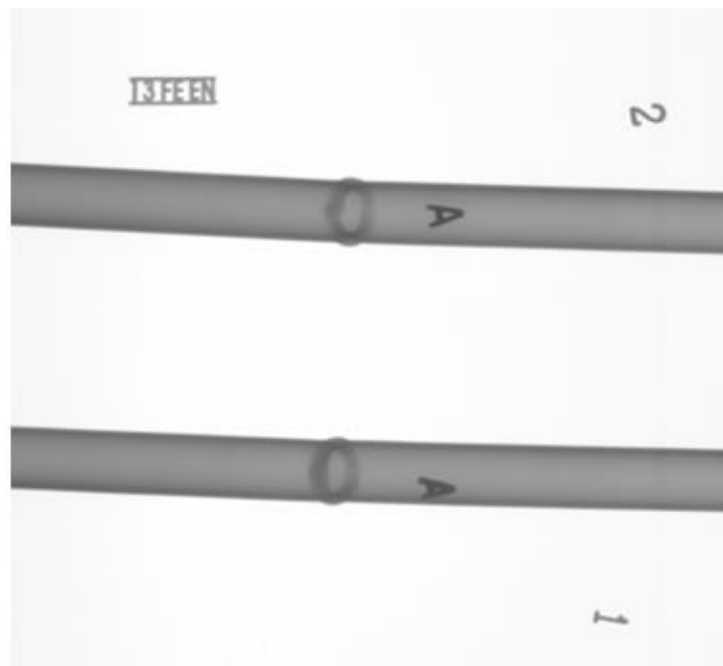
Napon fotomultiplikatora - 5.25 V,

Rezolucija skeniranja - 50  $\mu\text{m}$ .

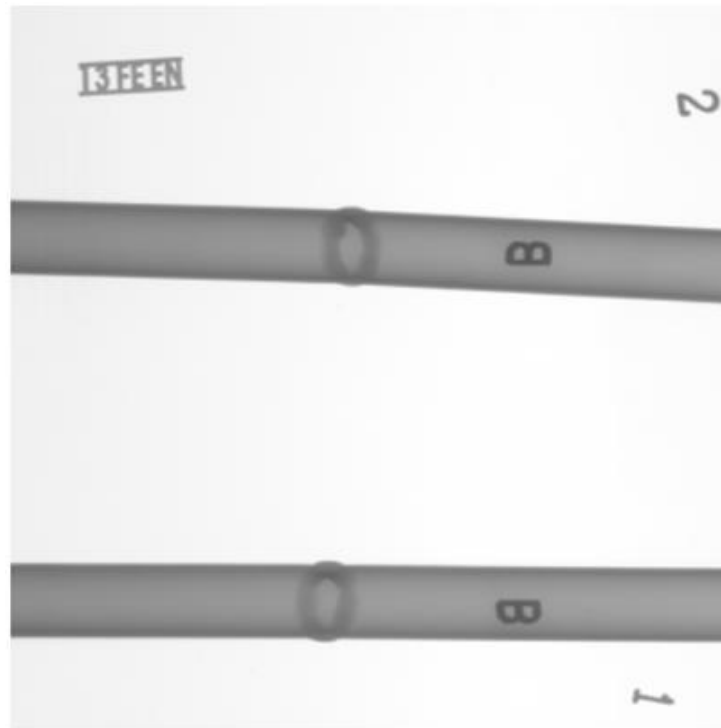


**Slika 31: Priprema uzorka za snimanje rendgenom**

Ispitni uzorci slikani su rendgenom u 2 različita položaja međusobno rotirana za  $90^\circ$  (položaj A i B) kako bi se u položaju B snimili dijelovi zavara koji se međusobno preklapaju u položaju A. U ispitnim uzorcima nisu pronađene nikakve nepravilnosti. Radiogrami uzoraka prikazani su u nastavku na slikama 32 i 33.



**Slika 32: Radiogram- položaj A**



**Slika 33: Radiogram- položaj B**

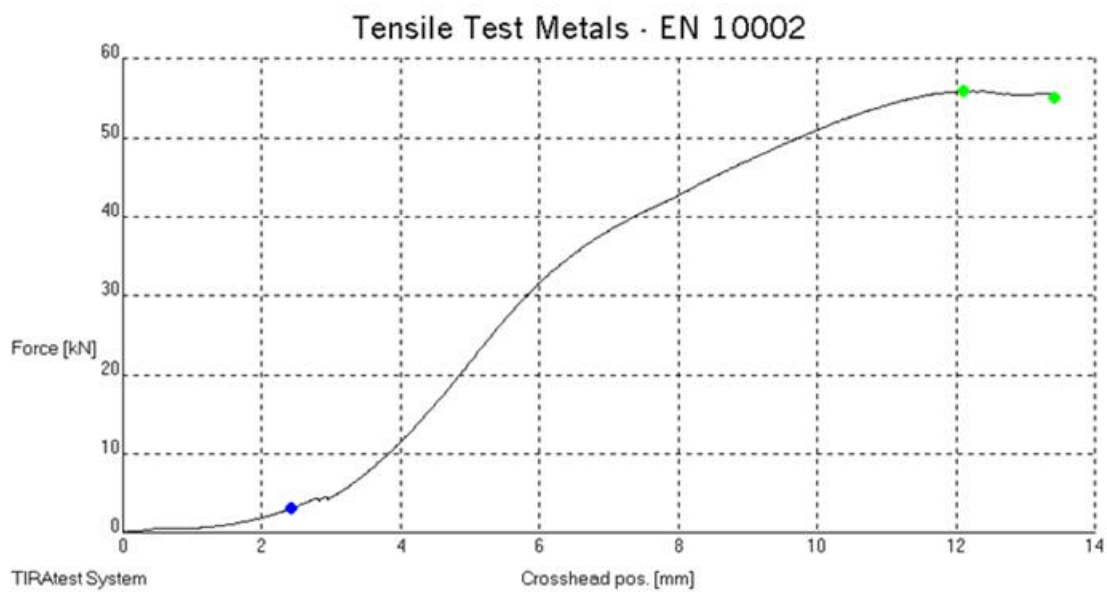
### 5.3.3 Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je vršeno na oba ispitna uzorka (A i B). Ispitivanje je provedeno na računalom upravljanoj, moderniziranoj verziji kidalice 400 kN (proizvođač: WPM, Njemačka; vrsta: EU 40MOD). U nastavku je prikazana priprema uzorka na kidalici prije ispitivanja (slika 34).



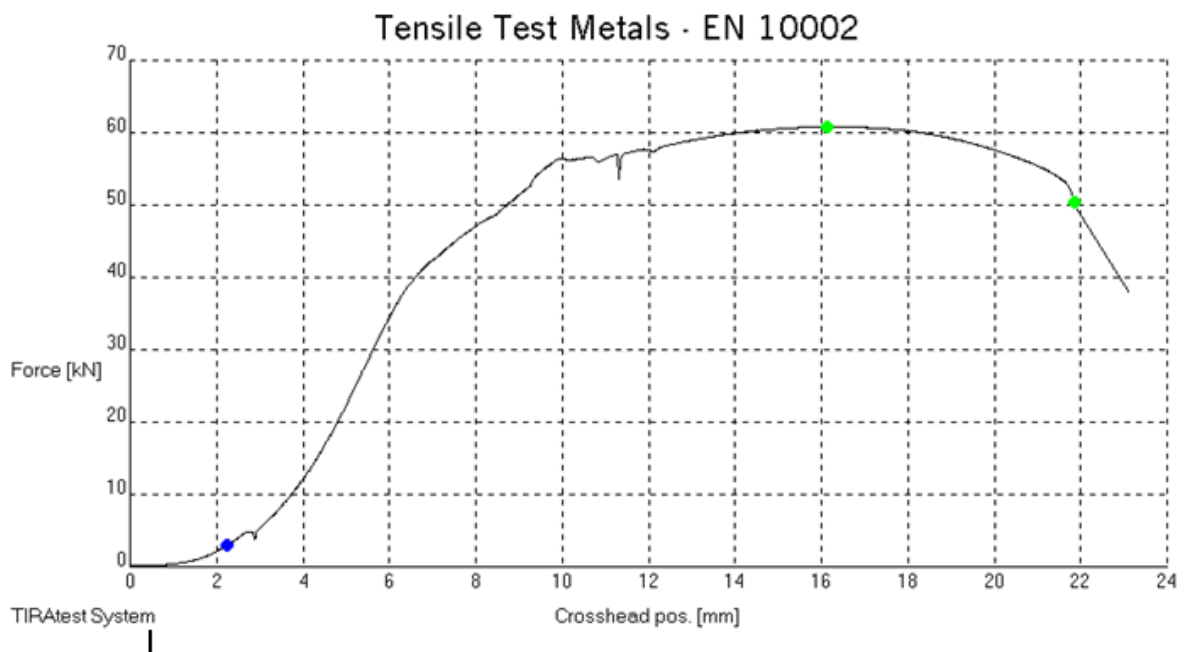
**Slika 34: Priprema uzorka na kidalici**

U nastavku su prikazani grafički rezultati statičkog vlačnog ispitivanja na slikama 35 i 36 i slike 37 i 38 ispitnih uzoraka nakon ispitivanja:



**Slika 35: Rezultati statičkog vlačnog pokusa- uzorak A**

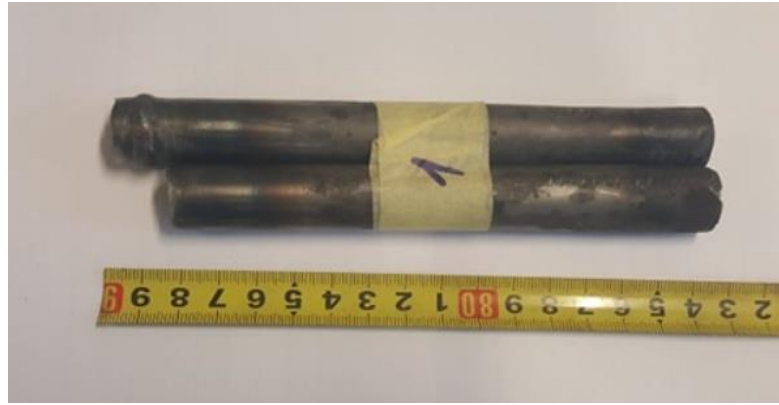
Uzorak A:  $F_m = 55,838 \text{ kN}$ ,  $R_m = 718,13 \text{ N/mm}^2$



**Slika 36: Rezultati statičkog vlačnog pokusa- uzorak B**

Slika:

Uzorak B:  $F_m = 60,841 \text{ kN}$ ,  $R_m = 782,48 \text{ N/mm}^2$



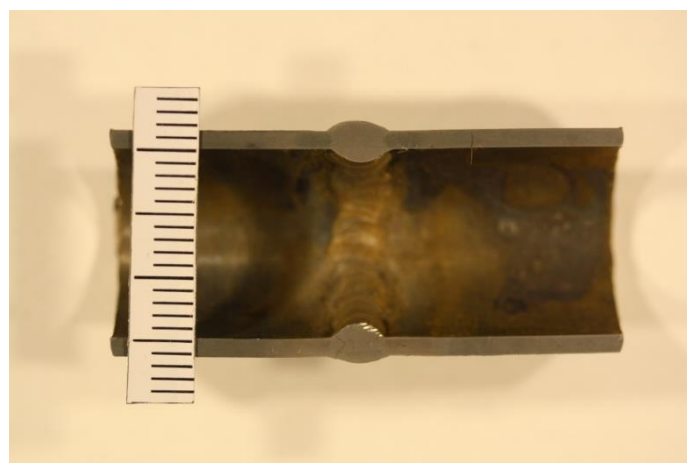
**Slika 37: Uzorak A nakon statičnog vlačnog pokusa**



**Slika 38: Uzorak B nakon statičkog vlačnog pokusa**

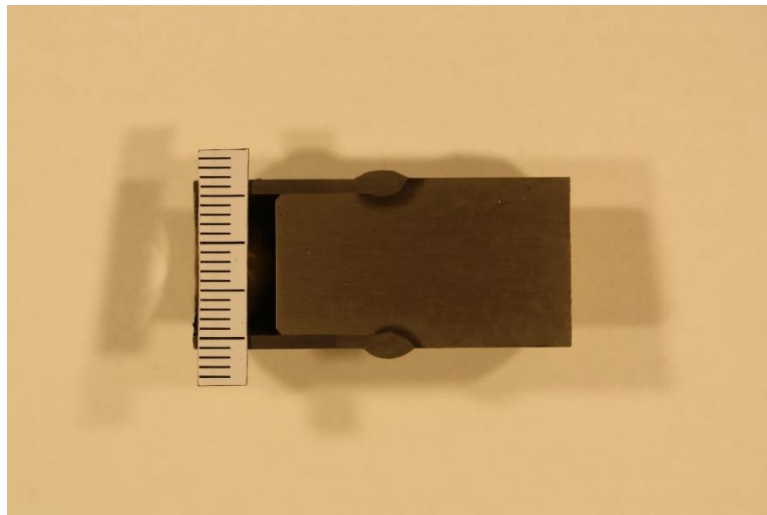
### 5.3.4 Izrada i analiza makroizbrusaka

U Laboratoriju za zavarivanje izrezani su primjerci uzoraka A i B te su pobrušeni. Pobrušeni uzorci odneseni su u Laboratorij za metalografiju gdje su ispolirani i zatim potopljeni u 3 postotnom nitalu. Svrha potapanja je u razvijanju strukture kristalnih zrna. Nagrizanje granice zrna metalnog ili legiranog uzorka se vrši sve dok ne postanu jasno prepoznatljive granice pojedinih zrna po boji. U nastavku se nalaze slike makroizbrusaka (slike 39 i 40).



**Slika 39: Makroizbrusak- uzorak A**

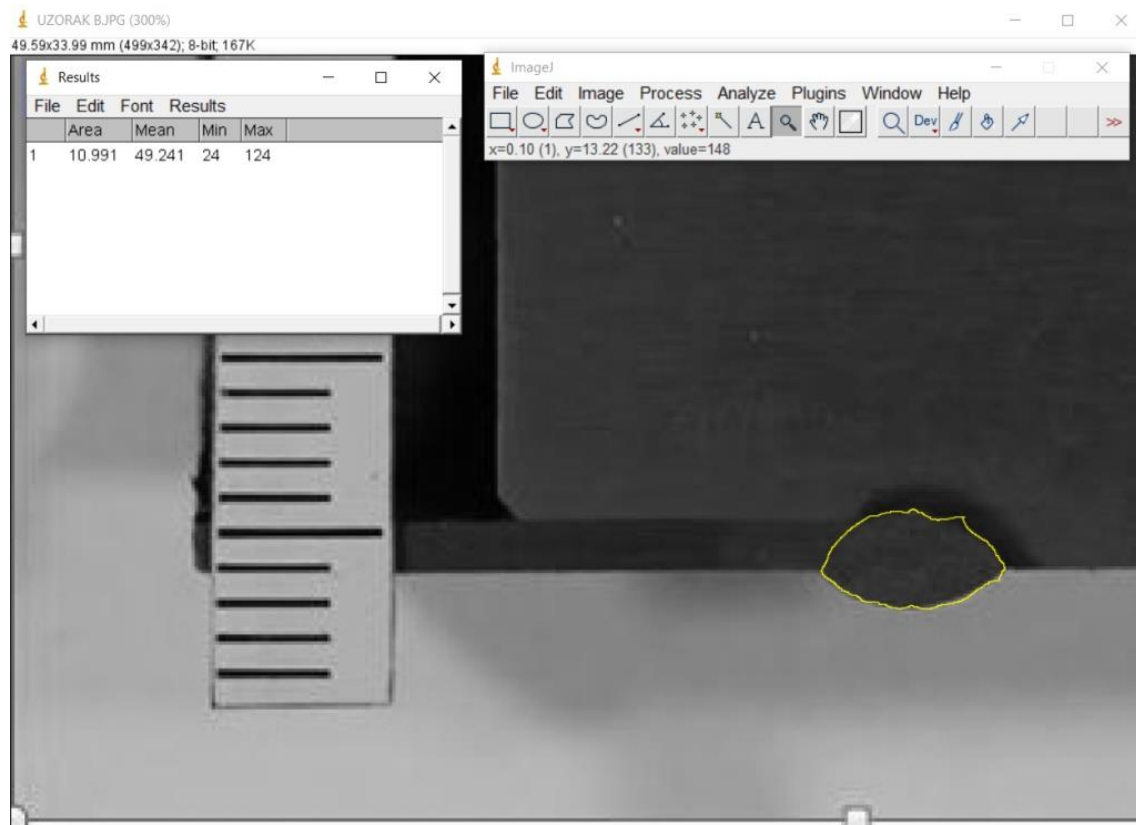




**Slika 40: Makroizbrusak- uzorak B**

### 5.3.5 Geometrija zavora

Na makroizbruscima uzoraka koji su snimljeni u Laboratoriju za metalografiju vršeno je mjerenje najvažnijih geometrijskih obilježja zavora pomoću programa ImageJ. U nastavku je prikazan primjer izmjere jedne mjere (površina zavora na uzorku B) na slici 41 te tablica 6 s rezultatima mjerenja.



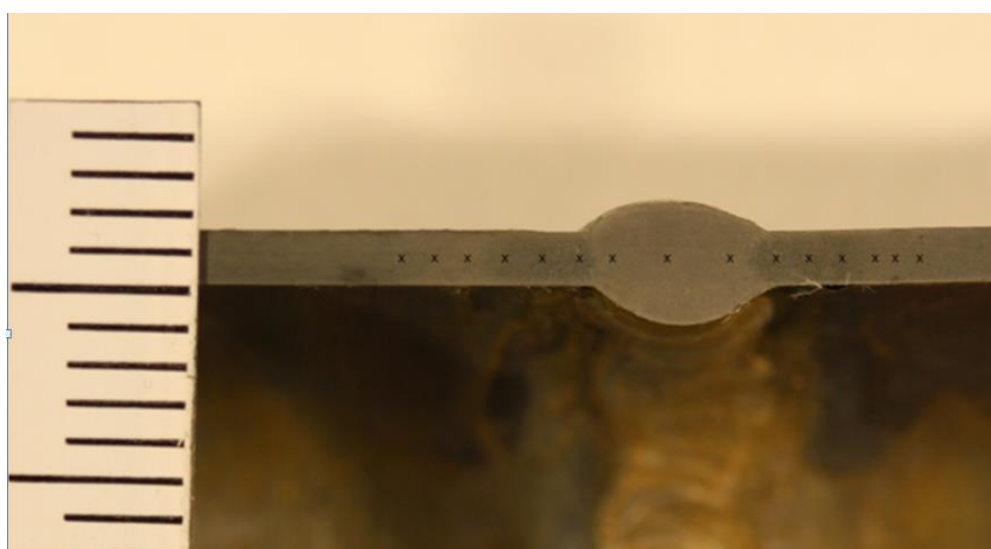
**Slika 41: Mjerenje površine zavora- uzorak B**

**Tablica 6: Rezultati mjerenja geometrije zavara**

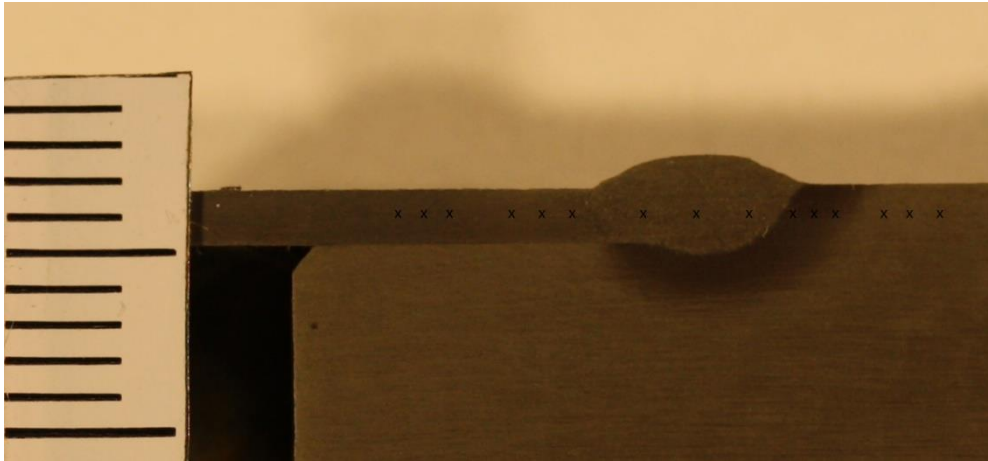
Mjerena veličina	Uzorak A	Uzorak B
Širina lica zavara sučeljenog spoja [mm]	4,74	5,66
Visina lica zavara sučeljenog spoja [mm]	0,89	0,92
Površina presjeka nadvišenja lica zavara [mm <sup>2</sup> ]	2,51	3,60
Širina korijena zavara sučeljenog spoja [mm]	4,53	5,50
Visina korijena zavara sučeljenog spoja [mm]	1,06	2,78
Površina presjeka nadvišenja korijena zavara [mm <sup>2</sup> ]	3,20	1,61
Površina presjeka zavara [mm <sup>2</sup> ]	11,72	10,99
Srednja širina zone utjecaja topline [mm]	2,63	0,89

### 5.3.6 Mjerenje tvrdoće po presjeku

U sklopu ispitivanja provedeno je mjerenje tvrdoće po presjeku zavara na unaprijed pripremljenim uzorcima. Ispitivanje je provedeno pomoću metode po Vickersu HV 10. Kod ove metode koristi se dijamantna četverostrana piramida koja se utiskuje u ispitni uzorak, a prema veličini ostavljenog otiska određuje se tvrdoća ispitnog uzorka. Mjerenja se vrše pomoću mikroskopa na kojeg se pomoću stega steže ispitni uzorak tijekom ispitivanja. Na odabrano mjesto se utiskuje dijamantna piramida, te se nakon toga uz pomoć mikroskopa mjeri veličina otiska. Mjerenje se vrši na svakom uzorku u 15 različitih točaka: po tri sa svake strane u zoni osnovnog materijala, po tri sa svake strane u zoni utjecaja topline te u tri točke u zoni metala zavara. Pozicije mjerenja tvrdoće i postupak mjerenja tvrdoće pomoću mikroskopa prikazani su na slikama 42, 43 i 34 u nastavku.



**Slika 42: Pozicije mjerenja tvrdoće po presjeku- uzorak A**



**Slika 43: Pozicije mjerenja tvrdoće po presjeku- uзорak B**



**Slika 44: Uređaj za mjerenje tvrdoće po presjeku metodom HV10**

Prema veličini otiska i pripadajućoj tablici, određuje se tvrdoća HV 10, a prema tablici za pretvorbu tvrdoća [23] određuju se vrijednosti pripadajućih vlačnih čvrstoća. Dobiveni podaci prikazani su u tablici 7 u nastavku.

**Tablica 7: Rezultati - mjerenje tvrdoće po presjeku**

Mjerenje	UZORAK A			Mjerenje	UZORAK B				
		HV 10	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]			HV 10	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
1	OSNOVNI MATERIJAL	194	242	776	1	OSNOVNI	294	292	938
2		285			2	MATERIJAL	287		
3		247			3	CIJEV	294		
4	ZONA UTJECAJA TOPLINE	351	351	1128	4	ZONA	254	271	868
5		342			5	UTJECAJA	283		
6		360			6	TOPLINE	281		
7	METAL ZAVARA	342	335	1077	7	METAL ZAVARA	354	349	1122
8		351			8		336		
9		312			9		357		
10	ZONA UTJECAJA TOPLINE	319	322	1036	10	ZONA	337	341	1098
11		312			11	UTJECAJA	330		
12		336			12	TOPLINE	357		
13	OSNOVNI MATERIJAL	256	238	764	13	OSNOVNI	228	244	782
14		235			14	MATERIJAL	254		
15		222			15	ŠIPKA	251		

Prema rezultatima statičkog vlačnog pokusa određena je vlačna čvrstoća: za uzorak A  $R_m = 718,13 \text{ N/mm}^2$ , a za uzorak B  $R_m = 782,48 \text{ N/mm}^2$ . Prema rezultatima mjerenja tvrdoće po presjeku najmanja vrijednost mjerenja je u točki 1 (194 HV10) te bi za nju vrijednost vlačne čvrstoće iznosila  $R_m = 622 \text{ N/mm}^2$  što se slaže s rezultatima statičkog vlačnog pokusa i s mjestom loma ispitnog uzorka (osnovni materijal u blizini zavara). Za uzorak B najmanje vrijednosti su zabilježene u području osnovnog materijala i području ZUT-a na strani cijevi, Iznosi vlačne čvrstoće dobiveni pretvorbom veći su od onih dobivenih statičkim vlačnim pokusom što se i slaže s mjestom loma uzorka B (na sredini cijevi relativno daleko od zavara).

## 6 Zaključak:

Krom molibden čelici imaju izrazito široku primjenu, koriste se u avio industriji, automobilske industriji, petrokemijskoj i mnogim drugim industrijama zbog dobre kombinacije mehaničkih svojstava što ih čini boljima od ostalih konvencionalnih čelika. U mnogim primjenama koriste se za zavarivanje, a zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva su vrlo visoki.

Upotrebom odgovarajućih postupaka zavarivanja postižu se zadovoljavajuća svojstva zavara. Za zavarivanje tankostijenih materijala od krom molibden čelika preporučuje se korištenje TIG postupka zbog veće kontrole unosa topline. Nije bitno samo odabrati odgovarajuću tehnologiju zavarivanja, već je potrebno odabrati i odgovarajuću opremu za zavarivanje što uključuje zaštitni plin, dodatni materijal, parametre zavarivanja, i dr. da bi se spriječile greške kod zavarivanja kao što su poroznost, ugorine, nedovoljno protaljivanje i pretjerana penetracija. Posebno treba obratiti pozornost na vrstu i stupanj čistoće plina, jakost struje, vrstu dodatnog materijala i čistoću osnovnog materijala.

Za provjeru kvalitete zavarenog spoja i mehaničkih svojstava nakon zavarivanja provedena su ispitivanja radiografijom, statički vlačni pokus, izrada makroizbruska, mjerenje i analiza geometrije zavara i tvrdoće po presjeku zavara. Na radiografskim snimkama u zavaru nisu pronađene nikakve nepravilnosti. Mjerenjem geometrije zavara nisu pronađene nikakve nepravilnosti u obliku zavara. Ispitivanjem na kidalici kod statičkog vlačnog pokusa došlo je do kidanja uzoraka u području osnovnog materijala što pokazuje da su zavari dobro izvedeni, a zavareni spoj zadovoljava tražena mehanička svojstva.

Sa stanovišta kvalitete cijelog zavarenog spoja oba ispitna uzorka su zadovoljila. Tehnologija zavarivanja korištena na ispitnim uzorcima kasnije je korištena i za zavarivanje ovjesnih elemenata bolida korištenog za natjecanje Formule student.

## Literatura:

- [1] Gojić, M. : Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Sisak, 2008.
- [2] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zt\\_zu.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zt_zu.html) Dostupno 25. 02.2019.
- [3] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š. : Priručnik - Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, katedra za zavarene konstrukcije, Zagreb, 2015.
- [4] Kožuh S. , Specijalni čelici – skripta, Sveučilište u Zagrebu – Metalurški fakultet, Sisak 2010.
- [5] Filetin T., Kovačićek F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [6] Stupnišek M., Cajner F: Osnove toplinske obrade materijala, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [7] Landek D., Toplinska obrada i površinska zaštita – predavanja, 2017./2018.
- [8] <http://e-metallicus.com/hr/metal/celik/elementi-u-celiku-i-njihov-utjecaj-na-svojstva-celika.html> Dostupno 25. 02.2019.
- [9] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/chromium-molybdenum-uses-and-fabrication-requirements> Dostupno 20.07.2020.
- [10] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14790> Dostupno 20.07.2020.
- [11] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D. : Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik 8, 4 (2014.)
- [12] <https://www.zavarivanje.info/cd/11940/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig-rel-autogeno> Dostupno 20. 07. 2020.
- [13] <http://www.theweldingmaster.com/welding-defects> Dostupno 20.07.2020.
- [14] <https://www.bernardwelds.com/the-basics-mig--p152389> Dostupno 20.07.2020.
- [15] <https://www.mecholic.com/2015/12/advantages-disadvantages-and-application-of-tig-welding.html> Dostupno 20.07.2020.
- [16] [https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb\\_dipl1/toc2/2\\_1.pdf](https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb_dipl1/toc2/2_1.pdf) Dostupno 20.07.2020.
- [17] [https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz\\_dipl3/3.1.pdf](https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3.1.pdf) Dostupno 20.07.2020.

- [18] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/best-practices-for-tig-welding-of-4130-chrome-moly-tubing-in-general-motorsports-and-aerospace-applications> Dostupno 20.07.2020.
- [19] <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/welding-how-to/Pages/chrome-moly-detail.aspx> Dostupno 27.07.2020.
- [20] [https://bib.irb.hr/datoteka/301629.SamardzicDespotovic\\_Klaric.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/301629.SamardzicDespotovic_Klaric.pdf) Dostupno 27.07.2020.
- [21] Z. Lulić, K. Ormuž, G. Šagi: Motorna vozila- Ovjes vozila- predavanja, 2015.-16.
- [22] HRN EN ISO 1011-2: 2001.
- [23] <https://www.bbshalmstad.se/en/infocenter/hardness-conversion-table> Dostupno 17.08.2020.

## **PRILOZI**

### I. CD-R disc