

Analiza tehnologije zavarivanja okvira električnog bicikla Thor

Daničić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:181470>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Daničić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Filip Daničić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću, osoblju Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za materijalografiju na pomoći pri izradi rada.

Posebno hvala asistentu, mag. ing. Mislavu Štefoku, na svim savjetima, kritikama i pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

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

Filip Daničić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

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

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza tehnologije zavarivanja okvira električnog bicikla Thor**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of welding technology on Thor electric bicycle frame**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu snimiti tehnologiju zavarivanja za izradu čelične konstrukcije električnog bicikla Thor. Za sve spojeve navesti parametre zavarivanja, izračunati unos topline te utvrditi redoslijed zavarivanja. Dati osvrt na zavarljivost materijala te prikladnost oblikovanja zavarenih spojeva. Za odabrane kritične spojeve, obzirom na intenzitet i vrstu opterećenja, analizirati postojeću tehnologiju i procijeniti eventualne rizike. Ocijeniti deformacije nastale uslijed zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na zavarenom okviru električnog bicikla Thor provesti ispitivanja mehaničkih svojstava i makrostrukture zavarenih spojeva. Definirati odgovarajući opseg ispitivanja te po potrebi oblikovati pomoćne alate. Sva ispitivanja zavarenih spojeva provesti sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1 Razina 2. Zaključno, ocijeniti prikladnost postojeće tehnologije zavarivanja okvira električnog bicikla Thor i dati preporuke za daljnja poboljšanja.

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

Zadatak zadan:
20. siječnja 2022.

Rok predaje rada:
24. ožujka 2022.

Predviđeni datum obrane:
28. ožujka do 1. travnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. IZBOR MATERIJALA	2
2.1. Svojstva materijala potrebna za izbor	3
2.2. Materijali za izradu okvira bicikla	4
2.2.1. Konstrukcijska izvedba i materijal za izradu električnog bicikla Thor	6
2.3. Konstrukcijski čelici	8
2.3.1. Ugljični čelici za tanke limove	10
2.3.2. Niskouglični čelici za trake	12
2.3.3. Čelici za žicu	12
3. IZBOR POSTUPKA ZAVARIVANJA	14
3.1. MIG/MAG zavarivanje	14
3.1.1. Parametri zavarivanja	17
3.1.2. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG zavarivanju	19
3.1.3. Karakteristike primjene i razvoja MIG/MAG impulsnog zavarivanja	19
3.1.4. Dodatni materijali za MIG/MAG zavarivanje	22
4. OBLIKOVANJE ZAVARENIH SPOJEVA	23
4.1. Osnovna pravila oblikovanja zavarenih konstrukcija	23
4.1.1. Ispravno konstruktivno oblikovanje u odnosu prema zavarivanju	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO	29
5.1. Priprema spoja	31
5.2. Korištena oprema za zavarivanje	33
5.3. Osnovni materijal	36
5.4. Dodatni materijal	36
5.5. Zaštitni plin	38
5.6. Tehnološki i tehnički parametri postupka zavarivanja	39
5.7. Oprema i parametri korišteni pri zavarivanju u TEP-u	40
5.8. Ispitivanje penetrantima	42
5.9. Priprema i analiza makroizbrusaka	45
5.10. Ispitivanje tvrdoće	53
6. ZAKLJUČAK	59
7. LITERATURA	61

POPIS SLIKA

Slika 1 Sile kojima je okvir bicikla opterećen tijekom vožnje [3]	4
Slika 2 Okvir bicikla proizvođača Cube [8]	5
Slika 3 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 1 [9]	7
Slika 4 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 2 [10]	7
Slika 5 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 3 [10]	8
Slika 6 Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [15]	15
Slika 7 Oprema korištena pri MIG/MAG zavarivanju [16]	16
Slika 8 Podjela naprezanja u zavaru pri skretanju toka sile	
a) u sučeljenom spoju b) u kutnom spoju [1]	24
Slika 9 Oblikovanje zavarenih dijelova pri dinamičkom opterećenju	25
Slika 10 Tok sile u kutnim zavarima	25
Slika 11 Podjela naprezanja u sučeljenom spoju (σ_k - zarezno djelovanje)	26
Slika 12 Savojno opterećeni zavareni spojevi	26
Slika 13 Privarena rebra	27
Slika 14 Zavareno podnožje	27
Slika 15 Komponente za izradu okvira električnog bicikla Thor	29
Slika 16 Komponente za izradu okvira električnog bicikla Thor, pogled odozgo	30
Slika 17 Lim 1, pogled odozgo	31
Slika 18 Lim 1, pogled sa strane	31
Slika 19 Lim 2, pogled odozgo	32
Slika 20 Lim 2, pogled sa strane	32
Slika 21 Sučeljeni spoj limova, PA položaj zavarivanja	33
Slika 22 Izvor struje za zavarivanje Welbee P400	34
Slika 23 Specifikacija dodatnog materijala [21]	37
Slika 24 Boca sa zaštitnim plinom M21	38
Slika 25 Regulator tlaka i mjerač protoka	38
Slika 26 Zavareni spoj izveden u Laboratoriju za zavarivanje na	40
Slika 27 Zavareni spoj izveden u proizvodnom pogonu TEP-a	42
Slika 28 Penetrantski sustav	43
Slika 29 Penetrantsko ispitivanje zavarenog spoja	44
Slika 30 Indikacije na površini zavarenih spojeva	45
Slika 31 Uzorci 1 (FSB) i 2 (TEP) prije rezanja na strojnoj pili	46
Slika 32 Uređaj za brušenje	47
Slika 33 Makroizbrusak - uzorak 1 (FSB)	47
Slika 34 Makroizbrusak - uzorak 2 (TEP)	48
Slika 35 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 1, presjek 1	49
Slika 36 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 1, presjek 2	49
Slika 37 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 2, presjek 1	50
Slika 38 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 2, presjek 2	50
Slika 39 Uzorak 1, presjek 1	51
Slika 40 Uzorak 1, presjek 2	52
Slika 41 Uzorak 2, presjek 1	52
Slika 42 Uzorak 2, presjek 2	53

Slika 43 Uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Vickersu	54
Slika 44 Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku uzorka 1	55
Slika 45 Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku uzorka 2	55
Slika 46 Izmjerene vrijednosti tvrdoća na uzorku 1	57
Slika 47 Izmjerene vrijednosti tvrdoća na uzorku 2	58

POPIS TABLICA

Tablica 1 Skupine svojstava i karakteristika materijala [4]	3
Tablica 2 Vrste čelika za tanke limove i njihova svojstva [4]	11
Tablica 3 Tehničke karakteristike izvora struje Welbee P400 [19]	35
Tablica 4 Kemijski sastav čelika DC01 [20]	36
Tablica 5 Mehanička svojstva čelika DC01 [20]	36
Tablica 6 Usporedba tehnologije, za zavarivanje spoja limova, na FSB-u i u TEP-u	41
Tablica 7 Geometrijske značajke makroizbrusaka	51
Tablica 8 Rezultati ispitivanja tvrdoće na uzorku 1	56
Tablica 9 Rezultati ispitivanja tvrdoće na uzorku 2	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	Širina zavarenog spoja
A ₁₀		Istezljivost
A ₈₀		Istezljivost
Al		Aluminij
Ar		Argon
b	mm	Nadvišenje zavarenog spoja
C		Ugljik
C1		Zaštitni plin za zavarivanje, 100% CO ₂
C _{ekv}		Ugljični ekvivalent
CO ₂		Ugljikov dioksid
Cr		Krom
Cu		Bakar
CV		Ravna statička karakteristika („constant voltage“)
HV10		Tvrdoća prema Vickersu, uz silu utiskivanja 10 kp
I	A	Jakost struje
I _o	A	Osnovna struja
I _p	A	Struja impulsa
M21		Zaštitni plin za zavarivanje, 82% Ar/18% CO ₂
MAG		Elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova
MAGC		MAG uz uporabu CO ₂ kao zaštitni plin
MAG-D		MAG uz prijenos metala kratkim spojevima
MAGM		MAG uz uporabu zaštitnih plinskih mješavina
MIG		Elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova
Mn		Mangan
Mo		Molibden
Ni		Nikal
O ₂		Kisik
OM		Osnovni materijal
P		Fosfor
Q	kJ/cm	Unos topline
R _e	MPa	Granica razvlačenja
R _m	MPa	Vlačna čvrstoća
R _{p0,2}	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
σ _k	MPa	Zarežno djelovanje
S		Sumpor
TEP		Tvornica električnih proizvoda
t _o	s	Vrijeme trajanja osnovne struje
t _p	s	Vrijeme trajanja impulsa
U	V	Napon
V		Vanadij

v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
ZUT		Zona utjecaja topline
η		Faktor iskoristivosti

SAŽETAK

U ovom radu provedena je analiza tehnologije zavarivanja spoja na okviru električnog bicikla Thor, tvrtke DC Bikes. U teorijskom dijelu rada opisan je izbor materijala pri izradi okvira bicikla, karakteristike MIG/MAG postupka zavarivanja koji se koristio za izvedbu ovoga spoja, te su dane osnovne informacije o pravilnom konstruktivnom oblikovanju s obzirom na zavarivanje.

Uzorci su zavareni, jedan u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, drugi u TEP-u. Pritom su korišteni različiti procesni parametri i oprema, navedeni u eksperimentalnom dijelu rada. Nakon zavarivanja oba spoja ispitana su penetrantskom tehnikom s ciljem otkrivanja eventualnih nepravilnosti otvorenih prema površini. Iz oba uzorka izrezani su makroizbrusci, te je provedena geometrijska analiza poprečnih presjeka zavara i ispitivanje tvrdoće.

Ključne riječi: okvir električnog bicikla, čelični limovi, parametri zavarivanja

SUMMARY

In this thesis, the welding technology of a joint on the frame of the electric bicycle Thor, of the company DC Bikes, was analyzed. In the theoretical part of the thesis, choosing the material for the construction of bike frames is described, as well as the characteristics of the MIG/MAG welding process which was used to perform the joint. Basic information about proper constructive design with respect to welding, was given.

The samples were welded, one in the Laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, the other one in TEP. Different equipment and process parameters were used in doing so, which is shown in the experimental part of the thesis. After welding, both joints were tested using penetrant inspection in order to detect possible irregularities open to the surface. Macrographs were cut out of both samples, geometric analysis of weld cross-sections and hardness testing were performed.

Key words: electric bicycle frame, steel sheets, welding parameters

1. UVOD

Zavarivanje spada u jedno od najvažnijih postupaka spajanja materijala. Prednost nad ostalim proizvodnim postupcima mu je ušteda troškova za modele i specijalne alate, kao i manji utrošak materijala nasuprot lijevanim i kovanim dijelovima. Tako je uz spretno oblikovanje moguće dobiti lakše konstrukcije bez gubitka na svojstvima kao što su čvrstoća i krutost [1].

Zavarivanje je tehnologija spajanja koja ima iznimnu važnost tijekom oblikovanja i izrade proizvoda raznih konstrukcija načinjenih od metalnih ili nemetalnih materijala. Danas je najšire primjenjivana tehnika spajanja metalnih konstrukcija. Poput svih ostalih tehnologija spajanja materijala, i zavarivanje ima svoj primarni zadatak, a to je osiguranje kompaktnosti spojenih dijelova i mogućnosti učinkovitog podnošenja predviđenih naprezanja. Svojstva zavarenog spoja ovise o vrsti osnovnog i dodatnog materijala te o odabranoj tehnologiji zavarivanja [2].

Tijekom vožnje, okvir bicikla podliježe različitim vrstama opterećenja kao što su opterećenje masom vozača, opterećenje pedaliranjem, opterećenje kočenjem i dr., koja se prenose na okvir bicikla. Stoga je potrebno da okvir bude dovoljno čvrst i krut kako bi mogao podnijeti sile bez deformacije i loma. Kako bi se ti zahtjevi ispunili, potrebno je odabrati odgovarajući materijal za izradu okvira, koji mora imati vrlo dobra mehanička svojstva [3].

S obzirom na odabrani materijal za izradu okvira i dijelove koje treba spojiti zavarivanjem, potrebno je odabrati odgovarajući postupak, kao i odgovarajuću tehnologiju koja će ispuniti tražene zahtjeve. Dodatni materijal se odabire u skladu s osnovnim materijalom te mora imati bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala kako bi se osigurala čvrstoća na zavarenim mjestima veća od čvrstoće na mjestima osnovnog materijala.

2. IZBOR MATERIJALA

Odabirom materijala pri izradi neke konstrukcije značajno se utječe na tehničke karakteristike i na troškove izrade i održavanja konstrukcije, odnosno na ukupnu konkurentnost proizvoda na tržištu.

Izbor materijala blisko je povezan s projektiranjem i konstruiranjem dijelova te izradom i razradom postupaka proizvodnje i montaže. Krucijalne odluke o materijalu koji se koristi obično donose konstruktori, iako se problem izbora odnosno ponovnog izbora može javiti i tijekom uporabe samog proizvoda. U početnoj fazi konstruiranja osnovni je zadatak uskladiti konstrukcijsko-tehnološke zahtjeve s jedne, i zahtjeve na svojstva materijala s druge strane. S obzirom da odluke donesene u konstrukcijskom odjelu utječu na oko 70% troškova proizvoda, vrlo je važan sustavni pristup u toj početnoj fazi nastajanja proizvoda. Sami proces konstruiranja nekog proizvoda nastaje iz prvotnog vizualnog koncepta, pri čemu je potrebno uzeti u obzir sljedeća svojstva proizvoda [4]:

- tehnička svojstva: proizvodna, funkcijska, eksploatacijska svojstva
- ekonomska svojstva: troškovi izrade i održavanja, prodajna svojstva
- društvena-humana svojstva: ergonomska, ekološka, estetska, kulturna svojstva
- pravna svojstva.

Pri odabiru materijala za neku konstrukciju postoje određeni zahtjevi na materijale i kriteriji izbora. Nije uvijek moguće ispuniti sve zahtjeve postavljene na materijal, pa se u konkretnoj situaciji gotovo uvijek traži rješenje koje ispunjava više pojedinačnih zahtjeva, odnosno traži se optimalno rješenje u postojećim uvjetima.

Osnovni zahtjevi materijala su sljedeći [4]:

- funkcionalnost – zahtjevi vezani uz funkcioniranje dijela, sklopa ili konstrukcije u cijelom životnom vijeku
- eksploatabilnost – ponašanje materijala tijekom uporabe
- tehnoložnost – mogućnost oblikovanja ili obrade materijala određenim tehnološkim postupcima (livljivost, rezljivost, oblikovljivost deformiranjem, zavarljivost, toplinska obradljivost, prikladnost za prevlačenje i površinsku zaštitu...)
- raspoloživost, nabavljivost i cijena materijala

- standardiziranost
- recikličnost i uništivost (ekologičnost)
- estetičnost.

2.1. Svojstva materijala potrebna za izbor

Jedan od glavnih problema prilikom dizajniranja i izrade nekog proizvoda odnosno konstrukcije je odabir odgovarajućeg materijala koji će podnijeti sva nametnuta opterećenja i naprezanja tijekom svog životnog vijeka. Pritom nije uvijek moguće točno predvidjeti sve sile koje djeluju na konstrukciju. U svrhu predviđanja tih opterećenja i smanjenja vremena proizvodnje konstruktori često provode niz numeričkih simulacija pomoću kojih se odlučuje koji je materijal u konačnici optimalan za koristiti pri izradi konstrukcije [5].

Najpristupačnija i najopširnija grupa podataka o svojstvima materijala proističe iz normiranih i dogovorenih laboratorijskih ispitivanja ispitnih tijela izvučenih iz poluproizvoda ili gotovih dijelova. Na taj se način dobivaju usporedivi podaci koji pri proračunu konstrukcija i odabiru materijala imaju najveću važnost. Preostali podaci proizlaze iz praćenja u proizvodnji i tijekom uporabe u obliku povratnih informacija, te upotpunjuju sliku svojstava i osobito mogućeg ponašanja materijala, tablica 1. [4].

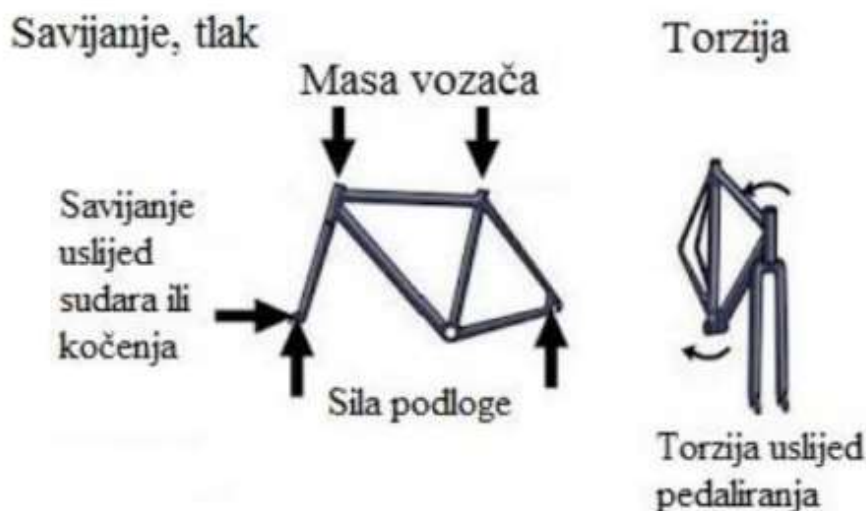
Tablica 1 Skupine svojstava i karakteristika materijala [4]

1. Sastav i mikrostruktura materijala
2. Fizikalna svojstva
3. Otpornost na kemijske, fizikalne i biološke utjecaje
4. Mehanička svojstva
5. Tehnološka (proizvodna) svojstva
6. Tribološka svojstva
7. Uporabne – eksploatacijske karakteristike
8. Tržišne karakteristike materijala i poluproizvoda

2.2. Materijali za izradu okvira bicikla

Vrlo važno kemijsko svojstvo koje treba razmotriti pri odabiru materijala za okvir bicikla je otpornost na koroziju. Od fizikalnih svojstava treba izdvojiti gustoću materijala. Bitna tehnološka svojstva su oblikovljivost deformiranjem (deformabilnost) i zavarljivost. Međutim, najvažnija i najzanimljivija svojstva materijala pri izradi okvira bicikla su mehanička. U grupu mehaničkih svojstava spadaju granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, tvrdoća, udarni rad loma, istezljivost, modul elastičnosti, dinamička izdržljivost i dr. [5][6].

Okvir bicikla je najveći i najteži dio bicikla, ujedno i njegova okosnica. Na okvir bicikla su pričvršćene sve ostale komponente. Za vrijeme vožnje, okvir bicikla podliježe različitim vrstama opterećenja kao što su opterećenje masom vozača, opterećenje pedaliranjem, opterećenje kočenjem i dr., koja se prenose na okvir bicikla, prikazano na slici 1. Kako bi okvir mogao podnijeti nametnute sile bez pojave deformacija i loma, potrebno je da ima zadovoljavajuća mehanička svojstva poput čvrstoće i krutosti [3].



Slika 1 Sile kojima je okvir bicikla opterećen tijekom vožnje [3]

Za izradu okvira bicikla koriste se različiti materijali koji imaju različita mehanička i kemijska svojstva. Nijedan materijal nije savršen, već svaki ima određene prednosti i nedostatke u odnosu na druge materijale. Različiti materijali zahtijevaju različite metode obrade i spajanja, imaju različitu nosivost, krutost, kao i druga svojstva.

Kao prvi izbor za izradu okvira bicikla tradicionalno je korišten čelik, sve do 1970-ih godina, zbog odličnih svojstava čvrstoće i krutosti, dostupnosti i jednostavnosti obrade. Jeftin je i trajan ako je dobro zaštićen. Koristi se više vrsta čelika za izradu okvira bicikla [3].

Osim čelika, uobičajeno je koristiti aluminij ili titan, odnosno njihove legure, za izradu okvira bicikla. U novije doba kao jedna od mogućnosti javila su se i karbonska vlakna, kompozitni materijal koji daje odlična mehanička svojstva, ali je vrlo skup te stoga nema široku primjenu kao čelik ili aluminij.

Glavni nedostatak čelika u odnosu na aluminijske i titanove legure je njegova gustoća. Gustoća konstrukcijskog čelika je oko tri puta veća od gustoće aluminija i oko dva puta veća od gustoće titana. Stoga je moguće proizvesti lakše okvire koristeći aluminij ili titan. Nedostatak aluminija je slabija čvrstoća i krutost od čelika te pokazuje lošije rezultate na zamor materijala. Međutim, jeftin je, dobro oblikovljiv i pokazuje dobru otpornost na koroziju. Titan je vrlo čvrst i krut materijal, lakši od čelika, korozijski vrlo otporan, ali od svih materijala korištenih pri izradi okvira bicikla, titanove legure su najskuplje [3][7].

Tradicionalno, konstrukcijska izvedba okvira bicikla izrađena je od cijevi te joj se oblik sastoji od dva trokuta, što je vidljivo na slici 2.



Slika 2 Okvir bicikla proizvođača Cube [8]

2.2.1. Konstrukcijska izvedba i materijal za izradu električnog bicikla Thor

U zadnjih nekoliko godina sve je veća potražnja za električnim biciklima. Pri projektiranju i konstruiranju okvira za električne bicikle treba uzeti u obzir potreban prostor za smještaj baterije. Pri tome razlikujemo eksterne i integrirane baterije. Što je veći kapacitet baterije potrebno je i više prostora, stoga se električni bicikli često izvode tako da je baterija integrirana unutar okvira bicikla.

S obzirom na položaj montaže motora, električne bicikle dijelimo na dva osnovna tipa. Motor može biti smješten na kotaču (tzv. hub motori) ili na okviru, kraj bottom bracketa (tzv. mid drive motori). Hub motore moguće je smjestiti na prednji ili zadnji kotač bicikla. Oni pružaju opciju regenerativnog kočenja, pri čemu je moguć povratak dijela kinetičke energije nazad u bateriju, umjesto gubitka na toplinu. S druge strane, izvedba električnog bicikla s mid drive motorom zahtijeva specijalno dizajniran okvir za smještaj motora. Raspodjela težine je bolja na mid drive biciklima jer se motor nalazi na donjem dijelu bicikla, uz nizak centar gravitacije, čime se postiže dobar balans. S obzirom da se elektronički sklopovi nalaze unutar okvira, puno je jednostavnije obavljati sitne popravke na biciklu kao što je promjena zračnice. Osnovna mana mid drive motora je ekstremno trošenje lanca i lančanika, jer se preko lanca odvija prijenos snage [3].

Neke od mogućih izvedbi prikazane su na slikama 3., 4. i 5., i po uzoru na te modele došlo je do ideje za razvoj električnog bicikla Thor, tvrtke DC Bikes iz Zagreba.

S obzirom da se koristi baterija velikog kapaciteta (1680 Wh) ona je integrirana u okvir bicikla, kako bi se postigla kompaktnost konstrukcije. Okvir će se izrađivati od limova, koje je potrebno strojno obraditi kako bi se postigle tražene dimenzije i željeni oblici, pri čemu će se koristiti tehnologije laserskog rezanja i savijanja.

Kao moguće materijale za izradu okvira razmatrani su u prvom redu čelik i aluminij. S obzirom na dostupnu tehnologiju i radi jednostavnosti obrade odabran je hladnovaljani niskouglični čelik oznake DC01.



Slika 3 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 1 [9]



Slika 4 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 2 [10]



Slika 5 Konstrukcija okvira električnog bicikla s baterijom integriranom u okvir, model 3 [10]

2.3. Konstrukcijski čelici

Čelici su u današnje doba najvažniji tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Više od 50% ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala čini čelik. Nakon lijevanja taljevine podešenog sastava u kokile, čelike se oblikuje postupcima deformiranja (valjanje, prešanje, kovanje i dr.) u traženi oblik poluproizvoda (limovi, trake, šipke, cijevi, profili i sl.).

Razlog tako široke primjene čelika u tehničke svrhe daje dobra kombinacija različitih svojstava, kao što su čvrstoća, udarni rad loma, rezljivost, spojivost, oblikovljivost deformiranjem, mogućnost modifikacije svojstava legiranjem, toplinskom obradom i obradom deformiranjem, te razmjerno niska cijena [4].

Najzastupljeniju skupinu čelika čine konstrukcijski čelici. Kao što se iz naziva može zaključiti, ovi se čelici koriste za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju određenu funkciju – prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, skladište i

transportiraju kapljevine ili plinove, zatvaraju ili povezuju elemente konstrukcije itd. Tu spadaju osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, poklopci, kućišta, ventili...

Na osnovu višestrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva [4]:

- a) mehanička svojstva – visoka granica razvlačenja R_e , uz dovoljno visoku istezljivost (plastičnu deformabilnost). Poželjno je da površina ispod dijagrama „sila-produljenje“ bude što je moguće veća radi sigurnosti od pojave krhkog loma. Dovoljno visoka granica puzanja, kao i čvrstoća pri povišenim temperaturama. Dovoljno visok udarni rad loma i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama, te dovoljna dinamička izdržljivost
- b) otpornost na trošenje – što manja promjena stanja površine zbog uzajamnog djelovanja dijelova u kontaktu, odnosno što manji gubitak mase
- c) otpornost na koroziju – korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim medijima, otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama uz prisutnost različitih plinova
- d) tehnološka svojstva – rezljivost (mogućnost obrade odvajanjem čestica), zavarljivost, hladna oblikovljivost (postupcima savijanja, dubokog vučenja, štancanja i sl.).

Pojedine vrste konstrukcijskih čelika sadrže upravo neka od spomenutih istaknutih svojstava ili kombinaciju svojstava. Preduvjet za pravilnu primjenu karakterističnih skupina čelika je dobro poznavanje njihovih svojstava.

Kao naročito važno tehnološko svojstvo treba istaknuti zavarljivost. Preduvjet dobre zavarljivosti je što manja vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_{ekv} , koji se uobičajeno računa prema formuli (1) [4]:

$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (1)$$

Zavarljivost čelika bit će tim bolja što je manji udio ugljika i što je manji udio legiranih elemenata, jer stupanj legiranosti povisuje prokaljivost, odnosno opasnost od pojave spontanog zakaljivanja. Dopuštena vrijednost iznosi $C_{ekv} < 0,4$. Čelike s većim vrijednostima

ugljičnog ekvivalenta C_{ekv} potrebno je predgrijavati, čime se osigurava sporije ohlađivanje nakon zavarivanja [4].

2.3.1. Ugljični čelici za tanke limove

Ugljični čelici koji se primjenjuju za izradu tankih limova debljine ispod 3 mm mogu se svrstati u dvije grupe [4]:

- a) niskougljični čelici – limovi namijenjeni oblikovanju deformiranjem
- b) ugljični čelici za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima (pripadaju skupini općih konstrukcijskih čelika).

Niskougljični čelici za tanke limove sadrže oko 0,1% C. Površina limova je glatka, sivkaste boje bez ljuskastih naslaga željeznih oksida. Najbitnije traženo svojstvo je deformabilnost (duktilnost), pa su zato pogodni za vučenje, savijanje i utiskivanje. Površina ovih limova pogodna je za nanošenje metalnih i nemetalnih prevlaka (lakiranje, emajliranje, pocinčavanje, kromiranje, prevlačenje polimerima) [4].

Hladnovaljani limovi dobivaju se postupkom hladnog valjanja iz platina koje se dobivaju prethodnom toplovaljanom redukcijom na debljine na 1-6 mm, koje su zatim pogodne da bi se iz njih moglo dalje hladnim postupkom valjanja dobiti hladnovaljane limove manjih dimenzija. Redukcija debljine se odvija u više postupaka hladnog valjanja na složenom valjačkom stanu dok se ne dobije željena dimenzija. Hladnim valjanjem dobivaju se limovi i trake male debljine i odličnih mehaničkih i tehnoloških svojstava. Hladnovaljani limovi koriste se u širokoj primjeni proizvodnje uglavnom kada je potrebno da proizvod ima lijepu glatku i ravnu površinu u sklopu nekog finalnog proizvoda [11][12].

Plosnati proizvodi koji se isporučuju u obliku ploča nazivaju se općenito limovima, a plosnati proizvodi manjih debljina (ispod 6 mm), koji se isporučuju u obliku kolutova, nazivaju se toplovaljane trake. Toplovaljane trake isporučuju se u kolutovima koji idu uglavnom na dalju obradu toplom preradom ili luženjem i hladnim valjanjem. Prethodno vruće valjani čelični limovi i trake, hlade se na sobnu temperaturu, podvrgnu se u tom stanju daljnjem valjanju koje se stoga zove hladno, iako se materijal, ovisno o stupnju deformacije i brzini valjanja, pritom zagrije i do 200 °C. Tehnološki proces dobivanja hladnovaljanih limova sastoji se od ovih osnovnih operacija: luženja (dekapiranja), hladnog valjanja, termičke obrade, eventualno ponovnog valjanja i modificiranja. Prije valjanja sa limova se odstranjuje oksidni sloj nastao pri vrućem valjanju i termičkoj obradi, i to se radi ili mehanički ili češće uranjanjem u

razrijeđenu sumpornu ili solnu kiselinu pri određenoj temperaturi, koja iznosi 70-80 °C. Odstranjivanje okujine sa površine lima naziva se luženje, odnosno dekapiranje, a provodi se u kadama. Stoga se ovu vrstu limova uobičajeno naziva i dekapirani limovi. Nakon luženja lim se pere i suši [12].

Prikaz vrsta ovih čelika naveden je u tablici 2. Uz svaku vrstu navedene su i dopunske oznake vezane za stanje površine – od P1 do P5.

Tumačenje tih oznaka je sljedeće [4]:

- P1 – površina ostvarena žarenjem lima u atmosferi bez zaštite od oksidacije tako da su dozvoljene boje popuštanja kao i labavo prionjena ogorina (oksidi)
- P2 – površina lima ostvarena žarenjem u metalnim sanducima sa zaštitnim poklopcem tako da su dozvoljene boje popuštanja i čvrsto prionjena ogorina
- P3 – površina lima bez ogorine
- P4 – površina lima bez ogorine ili sa zanemarivom hrapavošću zbog otpale ogorine. Površina može biti sjajna i zagasita (mat)
- P5 – površina lima bez ogorine i s malom hrapavošću. Ovo stanje uobičajeno se postiže samo s jedne strane lima dok je suprotna strana u pravilu P4.

Tablica 2 Vrste čelika za tanke limove i njihova svojstva [4]

Oznaka čelika	Kemijski sastav, %			R_m , MPa	R_e , MPa	Stanje površine
	C	P	S			
Č0145	0,15	0,05	0,05	280 - 500	-	P1, P3
DC01 (Č0146)	0,10	0,05	0,05	280 - 420	-	P2, P3, P4
DC04 (Č0147)	0,10	0,045	0,045	280 - 400	270	P4
DC04 (Č0148)	0,10	0,03	0,045	280 - 380	240	P5

Pri zavarivanju taljenjem, ovi limovi pokazuju vrlo dobru zavarljivost zbog malog masenog udjela ugljika. Limove stanja površine P3, P4 i P5 moguće je i točkasto zavarivati.

2.3.2. Niskougljični čelici za trake

Osim za limove, karakteristična primjena čelika DC01 i DC04 (Č0146, Č0147, Č0148) je i za izradu hladnovaljanih traka s različitim stupnjevima tvrdoće. U praksi se navode i opisi stupnjeva tvrdoće kao što su: mekožareno, 1/4 tvrdo, 1/2 tvrdo, 3/4 tvrdo, tvrdo, svjetlotvrdo. Stupnjevi tvrdoće ovise o žarenom ili deformiranom stanju [4]:

- mekožareno stanje - trake ovog stupnja tvrdoće najmekše su, vrlo plastične i pogodne za duboko vučenje te općenito za obradu deformiranje na hladno. Nisu elastično deformabilne
- očvrtnuto - trake koje su meke, plastične i pogodne za duboko vučenje i druge načine obrade deformiranjem. Slabo su elastično deformabilne
- 1/8 tvrdo - trake su plastične, ali nepogodne za duboko vučenje. Moguće ih je savijati i utiskivati
- 1/4 tvrdo - trake koje su malo plastične tako da je moguće izvoditi plitko vučenje i savijanje
- 1/2 tvrdo - trake ovog stupnja tvrdoće ograničeno se rabe za hladno deformiranje. Pogodne su za presijecanje
- 3/4 tvrdo - trake koje su elastične i mogu se presijecati
- tvrdo - trake koje su jako elastično deformabilne
- svjetlotvrdo – dobivaju se direktnim hladnim valjanjem sirovog čelika bez konačnog žarenja.

2.3.3. Čelici za žicu

Čelike za izradu žica dijeli se prema svojstvima i primjeni u tri grupe, i to za žice [4]:

- a) obične žice, od čelika DC01 (Č0146) i DC04 (Č0147) u stanjima: meko i svjetlotvrdo, a u stanjima površine: obična svijetla, modrožarena i pocinčana
- b) specijalne žice, od čelika DC01 (Č0146) i DC04 (Č0147), s različitim stupnjevima tvrdoće: meko, 1/8 tvrdo, 1/4 tvrdo, 1/2 tvrdo, 3/4 tvrdo i tvrdo. Što je viši stupanj tvrdoće, više je i vlačna čvrstoća (od 300 pa do više od 600 MPa), a manja istezljivost (A_{10} – više od 25% pa do 2%). Stanje površine može biti – bijeložarena, obična svijetla, sjajnosvijetla, pobakrena, fosfatirana, pocinčana

-
- c) vučene žice za toplinsku obradu i posebne namjene izrađene od čelika poboljšane rezljivosti, konstrukcijskih i alatnih čelika.

3. IZBOR POSTUPKA ZAVARIVANJA

Zavarivanje je tehnologija spajanja materijala pri kojoj se dijelovi koje je potrebno spojiti obično zagriju do omekšalog, plastičnog stanja te se rastale, a spajaju se taljenjem sa ili bez dodatnog materijala. Na taj način postiže se kontinuirani nerastavljivi spoj jednoličnih svojstava (čvrstoća, tvrdoća, udarni rad loma, otpornost na trošenje itd.). Zavarivanjem je moguće spajati metalne (čelik, Al, Cu, Ni i njihove legure) i nemetalne materijale (npr. termoplastični dijelovi). Od svih tehnika spajanja metalnih konstrukcija, zavarivanje danas ima najširu primjenu. Ono je istodobno kvalitetno i učinkovito [13].

Metal je za određenu primjenu zavarljiv nekim od postupaka zavarivanja ako je moguće postići homogenost spoja. Više je faktora koji utječu na zavarljivost nekog materijala, kao što su njegov kemijski sastav, sadržaj nečistoća, dimenzije dijelova koje je potrebno zavariti, dodatni materijal i priprema spoja za zavarivanje. Zavarljivost nije samo vezana uz svojstva osnovnog i dodatnog materijala, nego i uz postupak zavarivanja. Može se definirati i kao stupanj preklapanja svojstava zavarenih spojeva s odgovarajućim svojstvima osnovnog materijala ili se može ocijeniti stupnjem slabljenja osnovnog materijala radi prisustva zavarenog spoja [13].

3.1. MIG/MAG zavarivanje

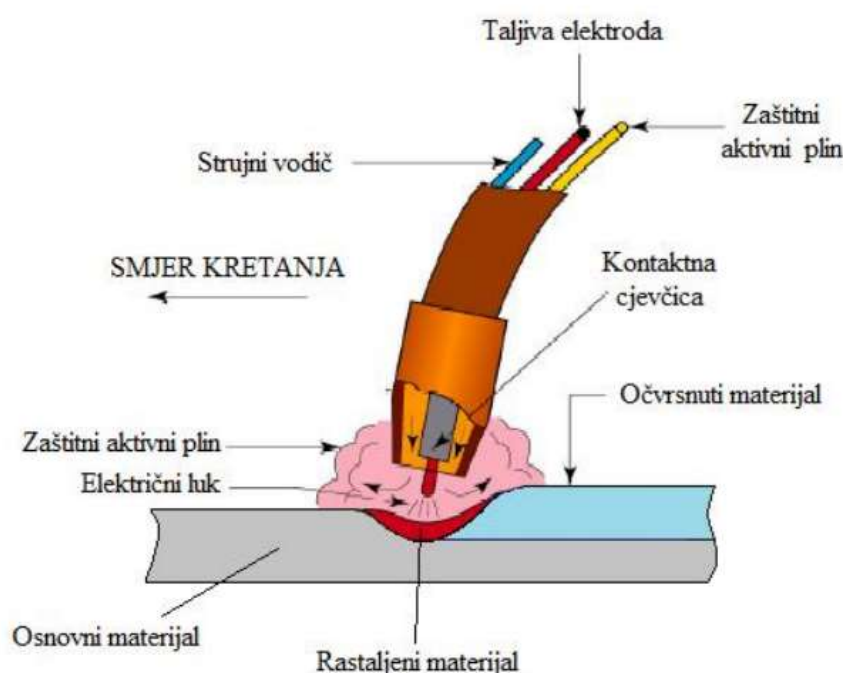
Elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih ili aktivnih plinova ubraja se u postupke zavarivanja taljenjem. MIG (eng. Metal Inert Gas) postupak zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (argon ili helij), dok se MAG (eng. Metal Active Gas) postupak zavarivanja odvija u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO₂ (MAGC postupak) ili u mješavini s većinskim udjelom CO₂ (MAGM postupak). MAG postupak zavarivanja uobičajeno se naziva i CO₂ postupak. Uređaji su kod MIG-a i MAG-a načelno isti, osnovna razlika je u vrsti korištenog zaštitnog plina [2][13].

Električni luk uspostavlja se između elektrode u obliku žice, koja je u pravilu spojena na „+“ pol izvora struje, i osnovnog materijala. Metalna elektroda (žica) i osnovni materijal kod ovog postupka tale se toplinom koju razvija električni luk. Žica je istovremeno i dodatni materijal, tj. njenim se taljenjem popunjava pripremljeni žlijeb. Shematski prikaz MAG postupka vidljiv je na slici 6.

MIG/MAG postupak može biti automatski (posve mehaniziran), poluautomatski (dodavanje žice u električni luk je mehanizirano, dok je držanje i vođenje pištolja ručno) ili robotiziran. Pri robotiziranom MIG/MAG postupku zavarivanja parametri se unaprijed programiraju, a zavarivač prati rad robota. U industriji se najviše primjenjuje poluautomatski MIG/MAG postupak zavarivanja jer je jednostavno prilagodljiv svim uvjetima rada i odlikuje ga visoka produktivnost [13].

Zavarivanje kao jedan od najzahtjevnijih procesa proizvodnje iziskuje posebno konstruiranu i izdržljivu opremu i izvore struje. Obzirom da se kao izvor topline koristi električni luk, napon i struja zavarivanja moraju odgovarati radnom području prikladnom za uspostavu i održavanje stabilnog električnog luka. Stabilnost i kvaliteta električnog luka također utječu i na integritet zavarenog spoja. Dakle, zavarivački izvor napajanja mora osigurati struju i napon transformacijom električne energije iz mreže [14].

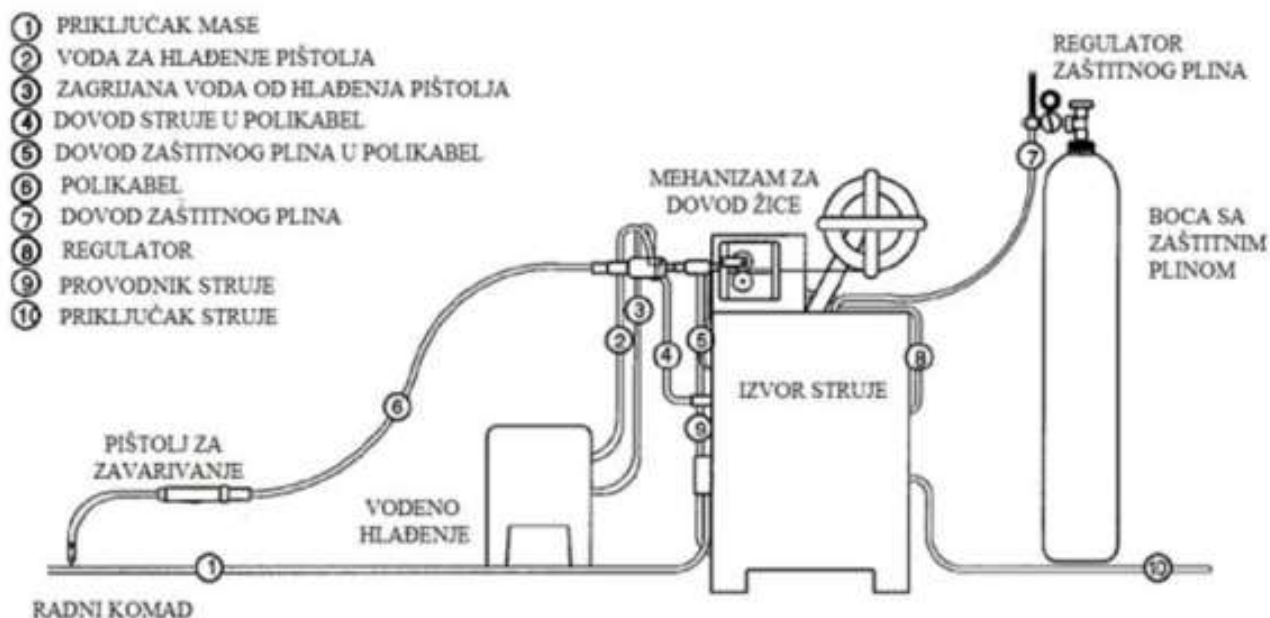
Struja zavarivanja dovodi se iz izvora vodičima, pri čemu je jedan od njih priključen na radni komad, a drugi preko razvoda upravljačkog ormara na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja protiče žicom za zavarivanje koja se kontinuirano i automatski odmotava s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin, spremljen u čeličnoj boci, na mjesto zavarivanja dolazi putem upravljačkog ormara kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Zaštitni plinski omotač koji dolazi kroz sapnicu pištolja upuhuje se u atmosferu električnog luka [13].



Slika 6 Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [15]

Prema slici 7., oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja se sastoji od:

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



Slika 7 Oprema korištena pri MIG/MAG zavarivanju [16]

Prije početka procesa zavarivanja uključi se izvor struje, podese se količina protoka plina i parametri zavarivanja. Pri poluautomatskom postupku zavarivač prinese pištolj radnom komadu i pritiskom preklopke na pištolju pokreće proces zavarivanja. Kroz sapnicu pištolja protiče zaštitni plin zavarivanja, uključen je izvor struje, pokreće se elektromotor za dovod žice. Prvo poteče plin kroz sapnicu, a zatim izlazi žica. Čim žica dodirne radni komad, zatvara se strujni krug i uspostavlja električni luk. Zavarivač pomiče pištolj određenom brzinom u smjeru zavarivanja te zavaruje koristeći se određenom tehnikom rada. Pod utjecajem

električnog luka dodatni materijal i osnovni materijal se tale i spajaju u jednu talinu te naposljetku skrućuju i time tvore zavareni spoj [13].

U slučaju primjene inertnih zaštitnih plinova (argon, helij ili njihove mješavine) ne dolazi do reakcije rastaljenog metala s plinom pa se takvi plinovi koriste pri zavarivanju materijala osjetljivih na utjecaj plinova iz atmosfere kao što su aluminij, bakar, titan i njihove legure, CrNi čelici itd. Međutim, ukoliko se zavaruju nelegirani konstrukcijski čelici primjereno je koristiti aktivne plinove, čisti CO₂ ili mješavine CO₂ sa argonom, kisikom ili drugim elementima [2].

Svaki postupak zavarivanja ima određene prednosti i nedostatke. Osnovne prednosti MIG/MAG postupka su sljedeće [17]:

- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala
- širok raspon parametara
- više različitih načina prijenosa materijala
- zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u proizvodnom pogonu ili na terenu
- mogućnost primjene različitih plinova i plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjenih žica
- širok raspon zavarivih debljina
- visoka učinkovitost i proizvodnost
- mogućnost automatizacije i robotizacije.

No, uz sve navedene prednosti, javljaju se i nedostaci kao što su [17]:

- problemi dovođenja žice (posebno pri zavarivanju aluminija)
- kod terenskih radova moguća pojava grešaka zbog loše zaštite i vjetra
- pojava grešaka uslijed neadekvatne tehnike rada i loše podešenih parametara zavarivanja
- rasprskavanje pri zavarivanju kratkim spojevima.

3.1.1. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja koji značajno utječu na kvalitetu zavarenog spoja izvedenog MIG/MAG postupkom su: jakost struje zavarivanja, napon električnog luka, promjer žice,

brzina zavarivanja, duljina slobodnog kraja žice, vrsta i protok zaštitnog plina, tehnika rada i induktivitet [13][17].

Podешavanje optimalnih parametara zavarivanja obavlja se probno. Jakosti struje kreću se u rasponu 120-300 A. Optimalna jakost struje ovisi o vrsti i debljini osnovnog materijala, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru dodatnog materijala odnosno žice. Jakost struje zavarivanja se prilagođava odabirom brzine dovođenja žice, pri čemu veća brzina dovoda žice znači i veću jakost struje. Povećanjem jakosti struje povećava se i penetracija te učinak taljenja. Stoga nije preporučljiv prekomjerni porast struje zavarivanja, jer vodi do većeg rasprskavanja materijala tijekom zavarivanja [13].

Za određenu jakost struje zavarivanja odabire se optimalan napon električnog luka, koji ovisi o duljini luka. Povećanje duljine električnog luka ostvaruje se povećanjem napona. Prekomjernim povećanjem napona ili duljine luka smanjuje se zaštita taline, što uzrokuje pogoršanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Radi boljih mehaničkih svojstava zavara pri određenoj jakosti struje potrebno je izabrati najniži napon luka. Bitno je uspostaviti optimalni odnos između količine taline i brzine zavarivanja. Prevelika količina taline i premala brzina zavarivanja i obratno uzrokuju greške u spoju poput naljepljivanja, karakteristično za MIG/MAG postupak zavarivanja [13].

Slobodni kraj žice se mjeri od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka, a treba iznositi 13 puta promjer žice (ali ne više od 20 mm). Veća odstupanja od te veličine dovode do promjene odnosa napona i struje zavarivanja.

Količina zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, promjeru žice, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Za kvalitetno zavarivanje nužno je osigurati određene količine zaštitnog plina. Strujanje zraka u zoni zavarivanja predstavlja otežavajuću okolnost koja može ozbiljno narušiti zaštitnu atmosferu. Pri zavarivanju kratkim spojevima i mješovitim lukom, količina zaštitnog plina treba pri optimalnoj potrošnji iznositi deset puta promjer žice. Ukoliko se prijenos metala ostvaruje štrcajućim ili impulsnim lukom koristi se više plina. Potrošnja plina raste pri zavarivanju na terenu. Kod zavarivanja sučeljenih i kutnih spojeva potrošnja plina je veća nego kod zavarivanja kutnih spojeva u žlijebu. Ako je količina zaštitnog plina premala, u zavarenom spoju moguća je pojava poroznosti, a ako je prevelika može doći do većeg miješanja plina i slabije zaštite zavara što također može uzrokovati poroznost [2][13].

3.1.2. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG zavarivanju

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja, ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka, definirana su četiri različita načina prijenosa metala: kratkim spojevima, štrcajućim lukom, mješovitim lukom i impulsnim lukom [2][13].

Prijenos metala kratkim spojevima vrši se uz male vrijednosti struje zavarivanja (50-170 A) i naponu električnog luka (13-21 V). Promjeri žica koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima iznose 0,8, 1,0 i 1,2 mm. Ostvaruje se mala količina rastaljenog metala, pa je ovakav način zavarivanja adekvatan za zavarivanje tankih limova, zavarivanje korijenskog zavara, kao i zavarivanje u prisilnim položajima.

Prijenos metala štrcajućim lukom postiže se uz velike jakosti struje zavarivanja (200-600 A) i visoke napone električnog luka (25-40 V). Promjeri žica koji se koriste pri zavarivanju štrcajućim lukom iznose od 1,2-2 mm. Pri velikim iznosima struje i povišenom naponu presudnu ulogu u prijenosu metala ima elektromagnetska sila, koja dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica, koje se prenose u kupku slobodnim letom bez pojave kratkih spojeva, uz konstantno održavanje električnog luka. Ovim načinom prijenosa ostvaruje se veliki unos topline što kao posljedicu ima duboku penetraciju, i visok učinak taljenja. Stoga je takav način prijenosa pogodan za zavarivanje predmeta velike debljine [2][13].

Prijenos metala prelaznim odnosno mješovitim lukom ostvaruje se pri naponima 22-25 V i jakosti struje zavarivanja 170-235 A. Prijenos metala djelomično se odvija kratkim spojevima, a djelomično slobodnim letom kapljica. Mješoviti električni luk obično se izbjegava jer može dovesti do nekontroliranog rasprskavanja [13][17].

Prijenosi metala kratkim spojevima, prelaznim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose metala. Danas se sve više koristi zavarivanje impulsnim strujama.

3.1.3. Karakteristike primjene i razvoja MIG/MAG impulsnog zavarivanja

Impulsno MIG/MAG zavarivanje razvijano je krajem 60-ih godina prošloga stoljeća. Za zavarivanje impulsnim strujama karakteristična je pojava strujnih impulsa određene frekvencije i trajanja. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, pri čemu se kap otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom. Prijenos se dakle ostvaruje slobodnim letom kapljice bez pojave kratkih spojeva. Takav prijenos moguće je realizirati i kod struja zavarivanja nižih vrijednosti od kritične struje tj. i u području struja kod kojih se pri klasičnom MAG zavarivanju prijenos metala ostvaruje kratkim spojevima. To je moguće postići jer je

vrijednost maksimalne struje impulsa I_p takva da, zbog djelovanja elektromagnetskih sila na vrhu žice, kapljica biva otkinuta i izbačena prema talini kao „projektil“ u svim položajima zavarivanja. Na taj način moguće je provesti lijepo i kontrolirano zavarivanje tankih materijala i provarivanje korijena, te izvesti zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvenciju impulsa, a time i broj kapi, moguće je namještati (optimalna frekvencija iznosi 50 Hz). Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature kapljice, pa je moguće upravljati smjerom prijenosa metala [2][13].

Impulsno MIG/MAG zavarivanje daje niz prednosti u odnosu na prirodne prijenose. Postiže se jednoličan zavar, smanjeno je rasprskavanje kapljica, osigurava se stabilan električni luk i kod manjih jakosti struje, široko je područje struje zavarivanja za pojedine promjere žice, moguća je primjena žice većih promjera za tanje materijale, moguća je primjena u svim položajima zavarivanja.

MIG/MAGM postupak impulsnog zavarivanja u praksi se koristi pri zavarivanju nelegiranih konstrukcijskih čelika, niskolegiranih, mikrolegiranih i visokolegiranih čelika, aluminija, bakra i njihovih legura. Najviše istraživanja provedeno je pri zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih čelika, bilo da se radilo o istraživanjima sa ciljem proučavanja prijenosa metala bilo za primjenu zavarivanja u praksi. Postupak je najširu primjenu pronašao u automobilske industriji, kotlogradnji, izradbi dizalica, izradbi spremnika, reaktora itd. Kod poluautomatskog, automatskog i robotiziranog zavarivanja ovaj postupak obično se provodi u zaštitnoj atmosferi plinskih mješavina 82%Ar + 18%CO₂ ili 90%Ar + 5%CO₂ + 5%O₂. Postupak se primjenjuje za zavarivanje i tankih i debelih limova (posebice za zavarivanje debelih limova u uskom žlijebu) u položenom i u prisilnim položajima [2][13].

Prije su korišteni tiristorski izvori struje za MIG/MAGM impulsno zavarivanje, dok se danas koriste tranzistorski izvori. Kod tiristorskih izvora impulsi su sinusoidalnog oblika, trajanja obično 1-7 ms, a na jednostavan način moguće je postići frekvencije 100, 50 i 25 s⁻¹. U praksi, uobičajeno je koristiti frekvencije 50 i 100 s⁻¹. Niže frekvencije primjenjuju se samo kod automatskih zavarivanja, zato što je pri poluautomatskom zavarivanju, zbog stroboskopskog efekta, otežan rad zavarivaču [2].

Pri zavarivanju uz sinusoidalni oblik impulsa (tiristorski izvori struje) ispravan odabir stabilnih parametara je otežan, posebno pri zavarivanju u prisilnim položajima. Za svaku frekvenciju potrebno je izabrati osnovnu struju zavarivanja I_o , maksimalnu struju impulsa I_p , vrijeme trajanja impulsa t_p , vrijeme trajanja osnovne struje t_o . Posljednjih godina intenzivno se radi na istraživanjima i razvoju tranzistorskih izvora struje za MIG/MAGM impulsno

zavarivanje. S takvim izvorima moguć je kontinuirani izbor bilo koje frekvencije, isto tako i visine i širine impulsa te osnovne struje I_0 bez međusobne ovisnosti. Primjenom tranzistorskih izvora struje moguće je jednostavnije odabrati stabilne parametre zavarivanja uz uvjet da se ostvari prijenos jedne kapljice za vrijeme svakog impulsa [2].

Impulsno MAGM zavarivanje primjenjuje se za zavarivanje svih vrsta čelika. U odnosu na klasično MAG zavarivanje nudi mnogobrojne prednosti, kao što su [2]:

- primjenom plinskih mješavina i impulsne struje zavarivanja ostvaruje se povoljniji prijenos metala, bez pojave kratkih spojeva, fizički izgled zavara jednolik je i gladak, a kemijsko metalurški sastav zavara je ravnomjerniji
- poradi smanjenog rasprskavanja smanjeni su gubici materijala i nema potrebe za čišćenjem površine radnog komada od naštrcanih kapljica čime se postiže znatno smanjenje troškova izrade. Pri automatskom i robotiziranom zavarivanju izbjegnuto je onečišćenje sapnice (začepljenje) i smanjen je broj čišćenja
- deformacije nakon zavarivanja manje su uslijed manje unesene topline, što je posebno važno pri zavarivanju tankih limova, jer je potreba za ravnanjem smanjena
- zavarivanje je moguće izvesti uz niže vrijednosti struja primjenom žica većih promjera, čime je moguće utjecati na smanjenje broja grešaka u zavaru, na primjer manja količina unesenog vodika
- primjenom impulsnog zavarivanja smanjuje se neophodni asortiman žica dodatnog materijala obzirom na promjer, jer se regulacijom parametara istom žicom kvalitetno zavaruju materijali različitih debljina
- moguće je ostvariti slobodan let kapljica i u prisilnim položajima zavarivanja te zaobići neke od nedostataka zavarivanja kratkim spojevima
- razvoj strojeva za zavarivanje usmjeren je ka sve većoj primjeni tranzistorskih izvora struje, čime se pojednostavljuje izbor parametara zavarivanja
- optimizirana i olakšana kontrola parametara zavarivanja i izbor optimalnih parametara zavarivanja razvojem sinergijskih uređaja za MIG/MAGM zavarivanje
- razvojem sinergijskih MIG/MAGM uređaja za zavarivanje moguće je na osnovu jedne zadane vrijednosti pojedinog parametra, npr. samo brzine dodavanja žice, utvrditi ostale potrebne parametre pomoću programa integriranog u izvor struje za zavarivanje.

3.1.4. Dodatni materijali za MIG/MAG zavarivanje

Pri MIG/MAG postupku zavarivanja koriste se pune žice promjera 0,6-2,4 mm, koje se namotavaju na kolute, i praškom punjene žice. Kako bi se postigao kvalitetan zavareni spoj, žica mora ispuniti određene uvjete što se tiče kemijskog sastava, kvalitete površine, odmatanja s koluta tijekom zavarivanja itd. Kemijski sastav dodatnog materijala treba biti sličan kemijskom sastavu osnovnog materijala, kojeg je potrebno zavariti. Radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije čelične žice su pobakrene ili poniklane. Žica mora biti točnih dimenzija, vrlo glatke površine i treba biti uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje kako bi se pravilno i jednako odmatala s koluta [2][13].

Osim punih žica primjenjuju se i praškom punjene žice. One mogu biti različitih presjeka, ovisno o načinu njihove proizvodnje. Praškom punjene žice se koriste uz plinsku zaštitu, a postoje žice koje raspadanjem jezgre same stvaraju zaštitnu atmosferu pa primjena zaštitnog plina nije potrebna.

Pune žice proizvode se hladnim vučenjem, dok se praškom punjene žice dobivaju od metalne trake (debljine 0,5 mm) koja se po duljini savija i zatim puni bazičnim ili rutilnim praškom određenog sastava. Praškom punjene žice prikladne su za terenske radove i tvrdo navarivanje, jer se legiranje navara ostvaruje pomoću praška [13].

4. OBLIKOVANJE ZAVARENIH SPOJEVA

Zavarene konstrukcije, u pogledu proračuna i oblikovanja, podliježu određenim propisima i zakonima. Konstruktori će rijetko kad zavarenu konstrukciju izvesti optimalno. Za to je potrebno opširno poznavanje tehnologije zavarivanja i materijala. Konstruktivnim oblikovanjem određena je kvaliteta i ekonomičnost. Naime, kvaliteta zavara nema istu važnost kao kvaliteta konstrukcije. Mnogi konstruktori koncentriraju se često samo na funkciju stroja ili uređaja te u fazi projektiranja i kasnije konstruktivne razrade ne pridodaju dovoljnu važnost tehnološki ispravnom konstruktivnom oblikovanju zavarenih konstrukcija. Stoga je potrebno surađivati sa inženjerima zavarivanja kako bi zavareni spojevi na konstrukciji bili ispravno tehnološki oblikovani [18].

Teško je dati neka općevažeca i jednostavna pravila ispravnog, konstruktivnog oblikovanja koja bi obuhvatila sve moguće utjecaje. Kod odluke za zavarenu konstrukciju bitnu ulogu poprima i izbor materijala. Osim upotrebljivosti konstruktor mora prije svega uzeti u obzir i zavarljivost materijala koji će se koristiti. Uzimanje u obzir svih mogućih rješenja predstavlja jamstvo za optimalno rješenje [18].

Zavarivanje kao tehnologija nerastavljivog spajanja pronalazi primjenu u širokom području strojarstva, u gradnji strojeva i postolja strojeva, elemenata za prijenos snage i gibanja, kao i samih prijenosnika. Pritom se omogućava primjena tzv. „lakih konstrukcija“, „lakih konstrukcija uporabom odgovarajućih lakih materijala“ i „lakih konstrukcija dobivenih primjenom odgovarajućih oblika“. Pod lakim konstrukcijama podrazumijeva se način gradnje s malim utroškom materijala. Sa svojom slobodom oblikovanja, zavarene konstrukcije omogućavaju primjenu lake gradnje [18].

4.1. Osnovna pravila oblikovanja zavarenih konstrukcija

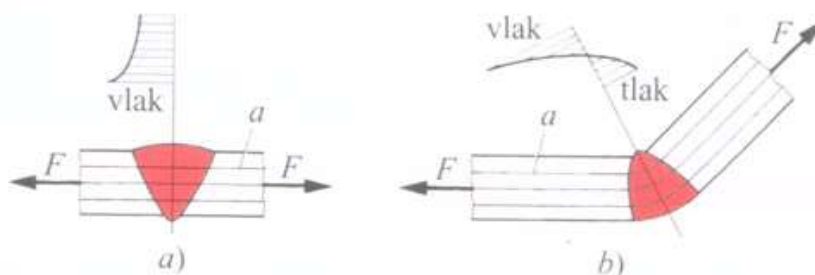
Zavarene konstrukcije moraju biti oblikovane tako da se omogući najekonomičnija izrada zavarene izvedbe. Nije moguće dati neke općevažeca smjernice pri oblikovanju zavarenih konstrukcija, koje bi konstruktor mogao mehanički primjenjivati na sve moguće konstruktivne zadatke. Bitno je voditi se prema osnovnim pravilima za oblikovanje konstrukcija i uzeti u obzir sve utjecajne faktore koji se javljaju pri projektiranju zavarenih konstrukcija [18].

4.1.1. Ispravno konstruktivno oblikovanje u odnosu prema zavarivanju

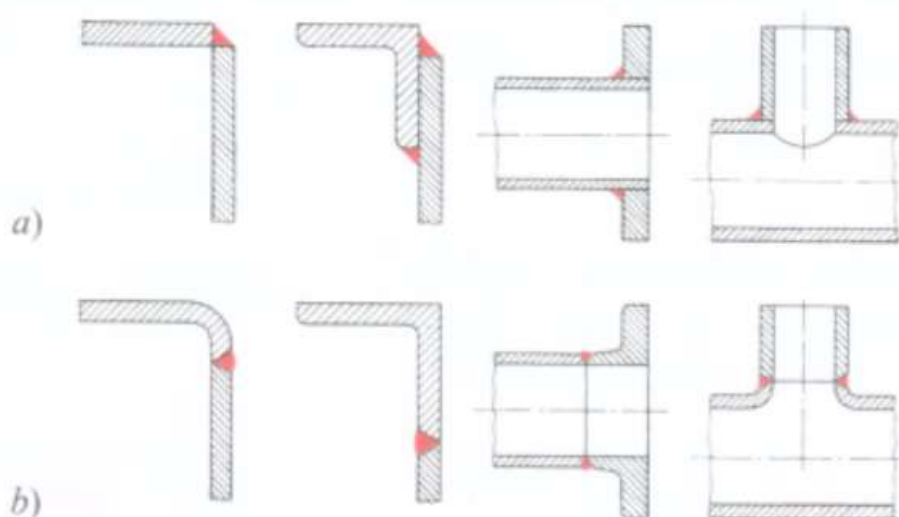
Pri konstruktivnom oblikovanju zavarenih konstrukcija treba voditi računa o karakteristikama zavarivanja, njegovim prednostima i nedostacima. Svaki konstruktor stoga bi trebao svoje projekte savjesno i kritički ispitati jesu li zavarivački pravilno oblikovani. Osim čvrstoće, u obzir je potrebno uzeti krutosti i ponašanje pri vibracijama. Kvaliteta zavarenog spoja ovisi i o kvalifikaciji i spretnosti zavarivača [1][18].

Važna pravila pri oblikovanju zavarenih konstrukcija su sljedeća [1][18]:

- 1) Najbolja konstrukcija je ona na kojoj se najmanje zavaruje – potrebno je iskoristiti sve dostupne tehnologije kako bi se uštedjelo na broju potrebnih zavara na konstrukciji (ukoliko je to moguće), u svrhu smanjenja troškova zavarivanja i ukupnih troškova izrade.
- 2) Izbjegavati skretanje toka sila u zoni zavarivanja – potrebno je pokušati ostvariti povoljan tok sila, jer je presudan za čvrstoću zavara. Skretanja u zoni zavarivanja uzrokuju vršna naprezanja, što je prikazano na slici 8. Optimalan tok sila postiže se sučeljenim zavarom, ali zato su kutni zvari ekonomičniji za izradu, ne samo jer ne zahtijevaju pripremu spoja već i zato što zavarivaču uzrokuju manje poteškoća pri zavarivanju od sučeljenog zavara sa žlijebljenim i ponovno zavarenim korijenom. Pri statičkom opterećenju zarezna djelovanja ne umanjuju čvrstoću, ali snizuju sposobnost plastičnog deformiranja i time povećavaju opasnost od krhkog loma. Pri promjenjivom opterećenju materijal se brže razara, tj. njegova dinamička izdržljivost je snižena. Slika 9. prikazuje kako je u zavarenim spojevima moguće izbjeći skretanje toka sila. Sučeljeni zavar dinamički je izdržljiviji nego kutni, budući da u njemu nema skretanja toka sila. Od kutnih zavara, udubljeni kutni zavar ima najveću dinamičku izdržljivost, jer je u njemu najblaže skretanje toka sila, slika 10.

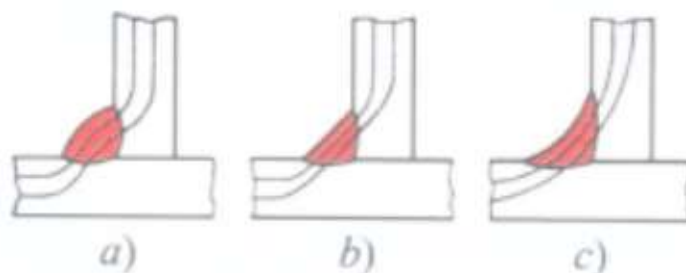


**Slika 8 Podjela naprezanja u zavaru pri skretanju toka sile
a) u sučeljenom spoju b) u kutnom spoju [1]**



Slika 9 Oblikovanje zavarenih dijelova pri dinamičkom opterećenju

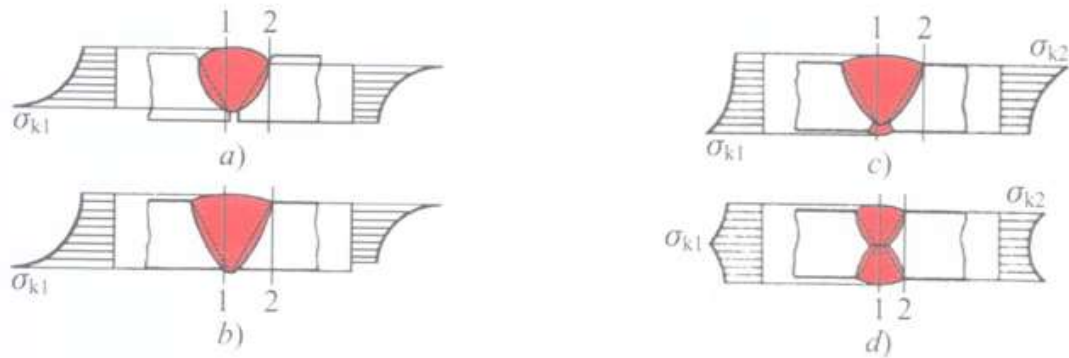
a) nepravilno b) pravilno [1]



Slika 10 Tok sila u kutnim zavarima

a) izbočen kutni zavar b) plosnati kutni zavar c) udubljeni kutni zavar [1]

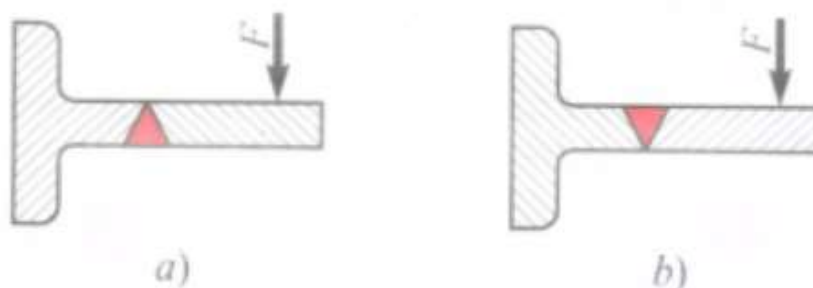
- 3) Izbjegavati zarezno djelovanje – loš spoj osnovnog i dodatnog materijala može prouzročiti veliko zrezno djelovanje (vršna naprezanja u korijenu), što u kombinaciji sa dinamičkim opterećenjem može uzrokovati lom uslijed zamora materijala. Kod dinamički opterećenih spojeva korijen se posebno zavaruje, ili se to izvodi kao dvostrani V-zavar. Slikom 11. prikazane su moguće izvedbe. Neravnomjerno ili valovito vučeni zavari također djeluju kao zarez. Obrada nadvišenja ili raskivanje umanjuju vršna naprezanja. Na početku i kraju zavara formiraju se krateri koji također izazivaju vršna naprezanja. Glodanjem tih krajeva zavara moguće je ublažiti vršna naprezanja.



Slika 11 Podjela napreznja u sučeljenom spoju (σ_k - zarezno djelovanje)

- a) V-zavar s lošim provarom korijena b) V-zavar s dobrim provarom korijena
c) V-zavar s obrušenim i zavarenim korijenom d) dvostrani V-zavar [1]**

- 4) Oblikovati ovisno o funkciji i opterećenju – oblikovanje zavarenih konstrukcija treba provesti tako da zavarena konstrukcija može preuzimati opterećenja do kojih dolazi tijekom eksploatacije. To su toplinska i korozijska opterećenja, kao i opterećenja koja izaziva trošenje, udarna opterećenja i zaostala napreznja. Kod zavarenih konstrukcija već se promjenom oblika zavarenog strojnog dijela javljaju različita napreznja. Sami zavar u zavarenom dijelu može predstavljati kritično mjesto. Zato treba paziti da se zavar ne nađe na mjestima visokih napreznja.
- 5) Izbjegavati vlačno napreznje u korijenu zavara – korijen zavara posebno je osjetljiv na vlačno napreznje i ako je moguće treba ga staviti u tlačnu zonu, što je vidljivo na slici 12.

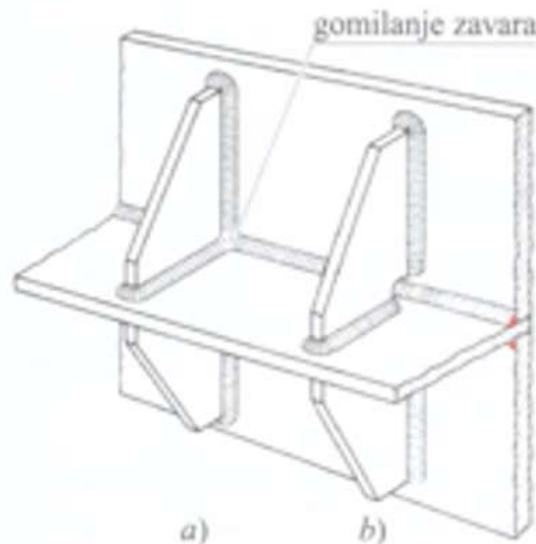


Slika 12 Savojno opterećeni zavareni spojevi

- a) nepovoljno zbog vlačnog napreznja u korijenu zavara b) povoljno zbog tlačnog napreznja u korijenu zavara [1]**

- 6) Izbjegavati gomilanje zavara – lokalno zagrijavanje tijekom zavarivanja i naknadno hlađenje dovode do napreznja zbog stezanja koja izazivaju deformacije zavarenog dijela. Što je veći broj zavara koji se sastaju u istoj točki i što su zavari deblji, to će

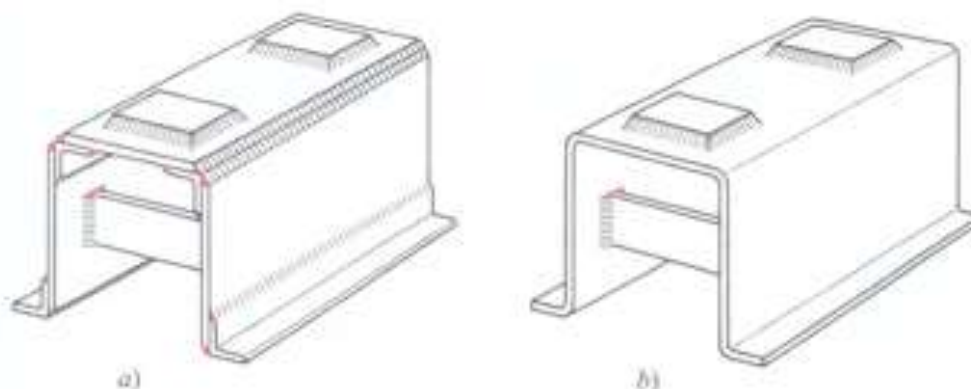
biti jače izvitoperenje. Kako je konstruktivnim mjerama moguće izbjeći gomilanje zavara prikazano je slikom 13. Zavareni šavovi ne smiju biti ni dulji ni deblji nego je potrebno. Izvitoperene dijelove potrebno je izravnati zagrijavanjem i kovanjem. Mjesta nagomilanih zavara pokazuju posebnu sklonost prema krtom lomu.



Slika 13 Privarena rebra

a) nepravilno zbog gomilanja zavara b) pravilno [1]

- 7) Dati prednost poluproizvodima – zavareni dio jeftiniji je ukoliko se koriste poluproizvodi. Daje se prednost plosnatim i profilnim čelicima, cijevima, skošenim ili savijenim ili autogeno rezanim limovima. Na slici 14. vidljiv je jedan primjer kako smanjiti broj potrebnih zavara.



Slika 14 Zavareno podnožje

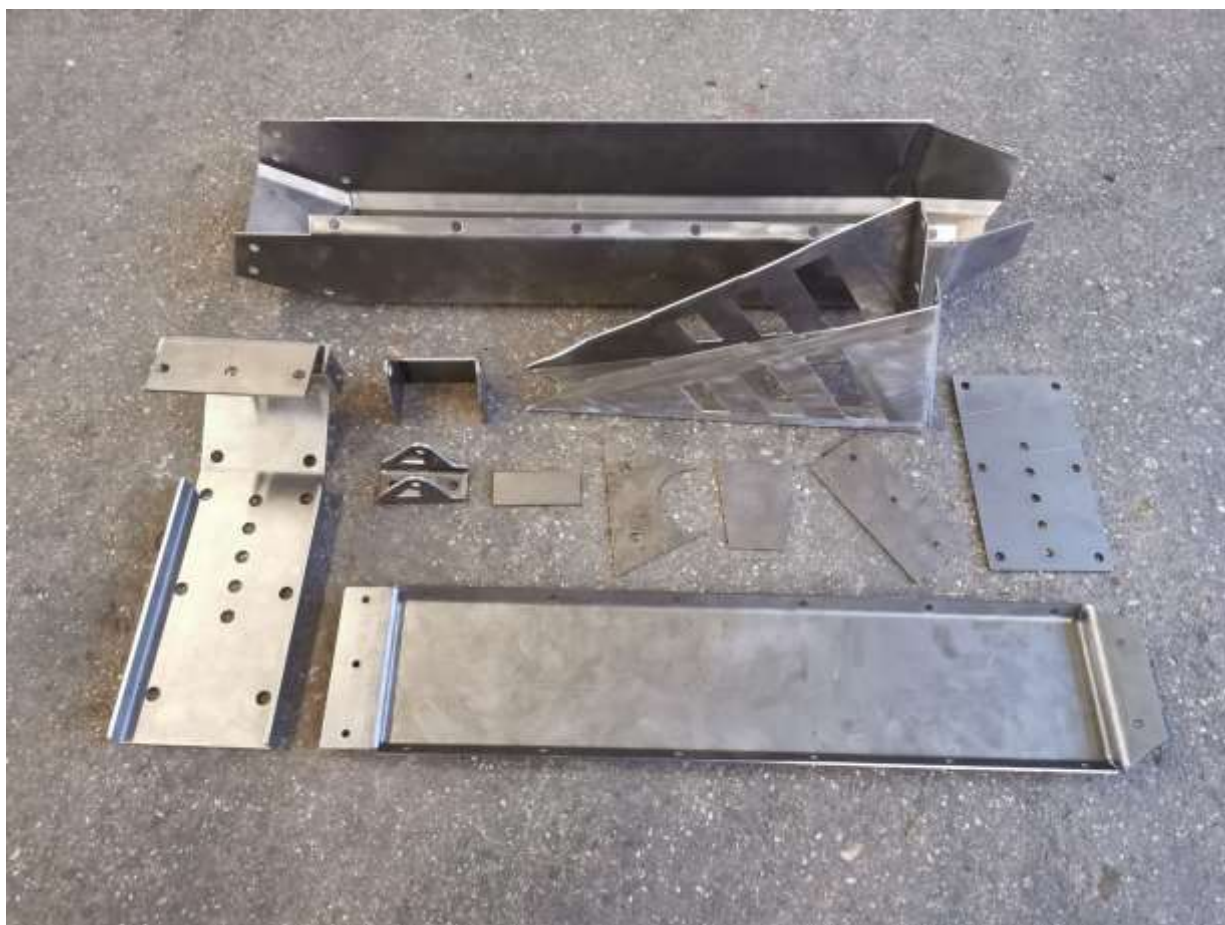
a) nepravilno zbog mnogih pojedinačnih dijelova i mnogo zavarenih spojeva b) pravilno [1]

- 8) Izbjegavati skupe pripreme radove – radovi krojenja i obrada rezanjem poskupljuju troškove izrade konstrukcije. Zato, ukoliko to situacija dopušta, valja izbjegavati tokarena smanjenja promjera, kose ili okrugle rubove limova, profila i sl. Savijanjem i pregibanjem rubova sastavnih dijelova često se može uštedjeti na broju zavarenih spojeva, slika 14.
- 9) Paziti na pristupačnost spojeva – mora postojati određena pristupačnost zavarivačkih alata do spojeva koji se zavaruju.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada trebalo je optimirati tehnologiju zavarivanja za jedan odabrani kritični spoj na okviru električnog bicikla Thor, tvrtke DC Bikes. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Isti zavareni spoj izveden je u proizvodnom pogonu tvrtke TEP – Tvornica električnih proizvoda d.o.o. u Začretju. Pritom su korišteni različiti procesni parametri. Nakon zavarivanja, za oba spoja provedeno je nerazorno ispitivanje penetrantima u svrhu otkrivanja eventualnih površinskih nepravilnosti. Naposljetku, iz oba spoja izrezani su makroizbrusci te je na dobivenim uzorcima provedeno ispitivanje tvrdoće.

Okvir se sastoji od više komponenata, kako je prikazano na slikama 15. i 16. Svi dijelovi su izrađeni od čeličnog lima DC01, obrađenog na laserskom rezaču i kutnoj savijačici, kako bi se postigle tražene dimenzije i željeni oblik.



Slika 15 Komponente za izradu okvira električnog bicikla Thor



Slika 16 Komponente za izradu okvira električnog bicikla Thor, pogled odozgo

5.1. Priprema spoja

Odabrana su dva dijela, prikazana slikama 17.-20. , koja je bilo potrebno međusobno zavariti.



Slika 17 Lim 1, pogled odozgo



Slika 18 Lim 1, pogled sa strane



Slika 19 Lim 2, pogled odozgo



Slika 20 Lim 2, pogled sa strane

S obzirom na međusobni položaj dvaju dijelova pri zavarivanju radi se o sučeljenom spoju. Kako bi se olakšalo zavarivanje, limovi su prije zavarivanja postavljeni na način da se zavaruje u PA (vodoravnom) položaju, kao što je vidljivo na slici 21.



Slika 21 Sučeljeni spoj limova, PA položaj zavarivanja

Prije provedbe zavarivanja limove je bilo potrebno očistiti od eventualnih nečistoća. Za tu namjenu korišten je etilni alkohol.

5.2. Korištena oprema za zavarivanje

Uz pomoć djelatnika Laboratorija za zavarivanje na FSB-u, odlučeno je da će se zavarivanje provesti impulsnim MAGM postupkom, a kao izvor struje korišten je Welbee P400 proizvođača Daihen Varstroj, prikazan na slici 22., a njegove tehničke specifikacije dane su u tablici 3.

Glavne značajke Welbee P400 izvora struje [19]:

- univerzalni model prikladan za zavarivanje čeličnih materijala, korozijski postojanih čelika te aluminijskih legura

- mogućnost visokokvalitetnog impulsnog optimiziranog zavarivanja sukladno tipu osnovnih materijala
- vrlo visoka stabilnost električnog luka i u području velikih brzina zavarivanja.



Slika 22 Izvor struje za zavarivanje Welbee P400

Tablica 3 Tehničke karakteristike izvora struje Welbee P400 [19]

Specifikacija	Welbee Inverter P400
Broj faza	3
Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Priključni napon	400 V \pm 15%
Priključna snaga	19,2 kVA, 17,4 kW
Nazivna primarna struja	27,6 A
Nazivna izlazna struja	400 A
Nazivni izlazni napon	34 V
Raspon struje zavarivanja	30 – 400 A
Raspon napona zavarivanja	12 – 34 V
Napon praznog hoda	80 V
Intermitencija	400 A / 50 %
	370 A / 100 %
Broj zavarivačkih programa	100
Maksimalni porast temperature	160° C
Radna temperatura	-10 – 40° C
Dopuštena vlažnost	20 do 80 % (bez kondenzacije)
Temperatura skladištenja	-20 – 55° C
Vanjske dimenzije (D \times Š \times V)	395 mm \times 710 mm \times 592 mm
Masa	62 kg
Statička karakteristika	Ravna (CV)

5.3. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal za izradu okvira korišten je hladnovaljani niskouglični čelik oznake DC01 sukladno normi HRN EN 10027-1:2016.

U tablici 4. prikazan je kemijski sastav (maksimalne vrijednosti) osnovnog materijala, a u tablici 5. njegova mehanička svojstva.

Debljine zavarivanih limova iznosile su 3 mm.

Tablica 4 Kemijski sastav čelika DC01 [20]

Kemijski element	C	Mn	P	S
Maseni udio elementa, %	0,12	0,60	0,045	0,045

Tablica 5 Mehanička svojstva čelika DC01 [20]

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A_{80} , %
≤ 270	270 – 410	28

5.4. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za zavarivanje odabrana je puna žica G 42 4 C/M 3Si1, prema normi HRN EN ISO 14341-A, proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ – SG2 promjera 1,2 mm. Specifikacija dodatnog materijala prikazana je slikom 23. Kao preporučeni zaštitni plin navodi se C1 ili M21, kao što je vidljivo iz specifikacije.

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R _{eL} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

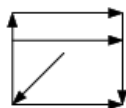
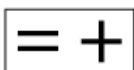
C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)
1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)	
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)	

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV



Slika 23 Specifikacija dodatnog materijala [21]

5.5. Zaštitni plin

Zaštitni plin odnosno plinska mješavina korištena za provedbu eksperimenta bio je M21, prema normi HRN EN ISO 14175. Trgovački naziv ove plinske mješavine je Ferroline C18. To je mješavina koja se sastoji od 82 % argona i 18 % CO₂. Slika 24. prikazuje bocu sa zaštitnim plinom, a slika 25. regulator tlaka i mjerac protoka, na kojem se očitava protok plina.



Slika 24 Boca sa zaštitnim plinom M21



Slika 25 Regulator tlaka i mjerac protoka

5.6. Tehnološki i tehnički parametri postupka zavarivanja

Prije zavarivanja, u Laboratoriju su utvrđeni tehnološki i tehnički podaci o radnim komadima i postupku zavarivanja. Odlučeno je da će se koristiti impulsno MAG zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plinske mješavine M21.

Osnovni materijal: hladnovaljani niskouglični čelik oznake DC01

Debljina osnovnog materijala: 3 mm

Vrsta spoja: sučeljeni

Položaj zavarivanja: PA (položeni)

Zaštitna plinska mješavina: M21 (82 % Ar/18 % CO₂)

Protok plina: 16 l/min

Dodatni materijal: EZ-SG2

Promjer žice: 1,2 mm

Slobodni kraj žice: 15 mm

Odabrano je impulsno MAGM zavarivanje jer omogućuje kontrolirano zavarivanje tankih materijala, ostvaruje se jednoličan zavar, minimizirano je rasprskavanje kapljica te je osiguran vrlo stabilan električni luk. Impulsno zavarivanje nudi još niz prednosti, što je opisano u teorijskom dijelu ovoga rada. Postupak je izveden poluautomatski, dakle dodavanje žice na mjesto zavarivanja je mehanizirano, a držanje i vođenje pištolja ručno je izvodio zavarivač.

Početni parametri su određeni uz pomoć djelatnika Laboratorija za zavarivanje na FSB-u na temelju iskustva.

Jakost struje je postavljena na 130 A, napon je tijekom procesa zavarivanja iznosio 22,5 V, a brzina zavarivanja 32 cm/min.

Vrlo bitan podatak pri zavarivanju je unos topline, koji se računa prema formuli (2) danoj u normi ISO EN 1011 – 1:2001 [22]:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \times \eta \quad (2)$$

Faktor iskoristivosti η varira ovisno o postupku zavarivanja. Pri MIG/MAG zavarivanju iznosi 0,8. Kada u formulu (2) uvrstimo vrijednosti struje I , napona U i brzine zavarivanja v_z dobivamo da je unos topline iznosio 4,34 kJ/cm.

Slikom 26. prikazano je lice spoja izvedenog u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u, uz gore navedene parametre.



Slika 26 Završeni spoj izveden u Laboratoriju za zavarivanje na

Zavar je pregledan vizualno i izgled mu je zadovoljavajuć, osim na par mjesta gdje je moguće da su se pojavile nepravilnosti otvorene prema površini. Vidljiva je neravnomjernost širine lica zvara na jednom njegovom završetku. Došlo je do rasprskavanja metalnih kapljica oko zvara i po površini spoja.

5.7. Oprema i parametri korišteni pri zavarivanju u TEP-u

Isti taj spoj izveden je u proizvodnom pogonu TEP-a, pri čemu je korišten MAG-D postupak zavarivanja, što znači da je prijenos metala ostvaren kratkim spojevima. Za tu namjenu korišten je izvor struje Varmig 350 Supermig.

Zavarivanje je provedeno u zaštitnoj atmosferi plinske mješavine trgovačkog imena Ferroline C8 proizvođača Messer Croatia Plin d.o.o., koja se sastoji se od 92 % Ar i 8 % CO₂. Protok plina iznosio je 12 l/min.

Tehnologija zavarivanja ovoga spoja korištena u TEP-u imala je nekoliko bitnih razlika u odnosu na tehnologiju propisanu na FSB-u, tablica 6. Zavareni spoj limova izveden u TEP-u vidljiv je na slici 27.

Tablica 6 Usporedba tehnologije, za zavarivanje spoja limova, na FSB-u i u TEP-u

	FSB	TEP
Osnovni materijal	DC01	DC01
Debljina osnovnog materijala	3 mm	3 mm
Vrsta spoja	Sučeljeni	Sučeljeni
Položaj zavarivanja	PA	PA
Prijenos metala	Impulsno	Kratki spojevi
Jakost struje zavarivanja	130 A	130 A
Napon zavarivanja	22,5 V	20 V
Zaštitna plinska mješavina	M21 (Ar/CO₂ 82/18)	M20 (Ar/CO₂ 92/8)
Protok plina	16 l/min	12 l/min
Dodatni materijal	EZ-SG2	EZ-SG2
Promjer žice	1,2 mm	0,8 mm
Slobodni kraj žice	15 mm	14 mm



Slika 27 Zavareni spoj izveden u proizvodnom pogonu TEP-a

Izgled zavara je nešto lošiji od zavara izvedenog u Laboratoriju. Širina lica zavara je vrlo neravnomjerna, kao i površina zavara. Vidljive su površinske nepravilnosti na spoju i došlo je do prekomjernog rasprskavanja.

Vizualnom kontrolom ustanovljeno je da je zavar izveden na FSB-u bolje geometrije i ravnomjerniji po cijeloj dužini, uočljivo je manje rasprskavanje te nema jasno uočljivih nepravilnosti otvorenih prema površini kao na spoju koji je zavaren u TEP-u.

5.8. Ispitivanje penetrantima

Nakon zavarivanja provedeno je penetrantsko ispitivanje oba uzorka u svrhu otkrivanja površinskih nepravilnosti. Pri tome je korišten penetrantski sustav, prikazan slikom 28., koji se sastoji od penetranta (tekuće sredstvo), odstranjivača suviška penetranta i razvijaa. Prema obojenosti penetrante dijelimo na obojene (crvene) i fluorescentne. Penetrantsko ispitivanje sastoji se od sljedećih bitnih koraka [23]:

- priprema površine – čišćenje
- nanošenje penetranta – vrijeme penetriranja 5 – 60 min

- odstranjivanje suviška penetranta s površine
- nanošenje razvijaača – vrijeme razvijanja 10 – 30 min
- promatranje – praćenje razvijanja indikacija za vrijeme razvijanja
- pregled i bilježenje indikacija – nakon isteka vremena razvijanja
- završno čišćenje.



Slika 28 Penetrantski sustav

Zavar izveden u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u nakon nanošenja obojenog penetranta prikazan je slikom 29.



Slika 29 Penetrantsko ispitivanje zavarenog spoja

Nakon nanošenja penetranta, vrijeme penetriranja trajalo je 20 minuta. Zatim su penetranti odstranjeni s površine spoja te je nanešen razvijач. Nakon 15 minuta, koliko je trajalo vrijeme razvijanja, pojavile su se indikacije na površini spojeva, što je prikazano slikom 30., pri čemu je lijevi uzorak zavaren u TEP-u, a desni na FSB-u.



Slika 30 Indikacije na površini zavarenih spojeva

Nakon provedbe svih koraka penetrantskog ispitivanja i pojave indikacija, uslijedio je završni pregled, koji se vršio vizualno. Na slici 30. jasno je vidljivo kako se na desnom uzorku pojavila jedna crvena indikacija, dok je na lijevom uzorku velik dio površine spoja poprimio crvenu boju. Indikacije koje su se pojavile ukazuju na potencijalne nepravilnosti otvorene prema površini, kao što su pore i pukotine. S obzirom na brojnost i veličinu indikacija koje su se pojavile na površini spoja izvedenog u TEP-u, u spoju bi vrlo lako moglo doći do pucanja u eksploatacijskim uvjetima, dakle spoj nije zadovoljavajuć.

5.9. Priprema i analiza makroizbrusaka

Nakon ispitivanja penetrantima trebalo je provesti geometrijsku analizu makroizbrusaka i ispitivanje tvrdoće. Kako bi to bilo moguće, bilo je potrebno iz oba uzorka izrezati makroizbruske. Priprema za rezanje makroizbrusaka prikazana je slikom 31. Makroizbrusci su zatim rezani na strojnoj pili.



Slika 31 Uzorci 1 (FSB) i 2 (TEP) prije rezanja na strojnoj pili

Brušeni su poprečni presjeci oba makroizbruska, brusnim papirima različitih gradacija, od grublje prema sitnijoj, uz završnu P150. Nakon toga, u Laboratoriju za materijalografiju, uzorci su brušeni na uređaju za brušenje sa brusnom pločom, slika 32. Pri tom su korišteni brusni papiri gradacija P320, P600, P1200 i posljednje P2400. Pri svim koracima brušenja glavna ploča vrtila se brzinom od 300 okretaja u minuti. Tokom brušenja, iznad uzoraka postavljena je cijev kroz koju je puštena voda za hlađenje i podmazivanje. Nakon brušenja, površine poprečnih presjeka uzoraka sjajile su se, ali da bi se jasnije vidio zavar i osnovni materijal uzorci su nagriženi u otopini za nagrivanje. To je provedeno u digestoru, posebno konstruiranom ormaru sa ventilatorom u kojem se izvode određeni kemijski postupci koji mogu biti opasni po zdravlje čovjeka. Unutar digestora nalazile su se dvije staklene posude, unutar jedne nalazila se obična voda, unutar druge 3%-tni nital. Oba uzorka prvo su bila u posudi sa nitalom u trajanju od deset sekundi, a nakon toga izvađeni su i stavljeni u posudu s vodom kako bi se prekinula kemijska reakcija, te naposljetku osušeni. Slikama 33. i 34. prikazani su makroizbrusci nakon brušenja, nagrivanja i sušenja.



Slika 32 Uredaj za brušenje

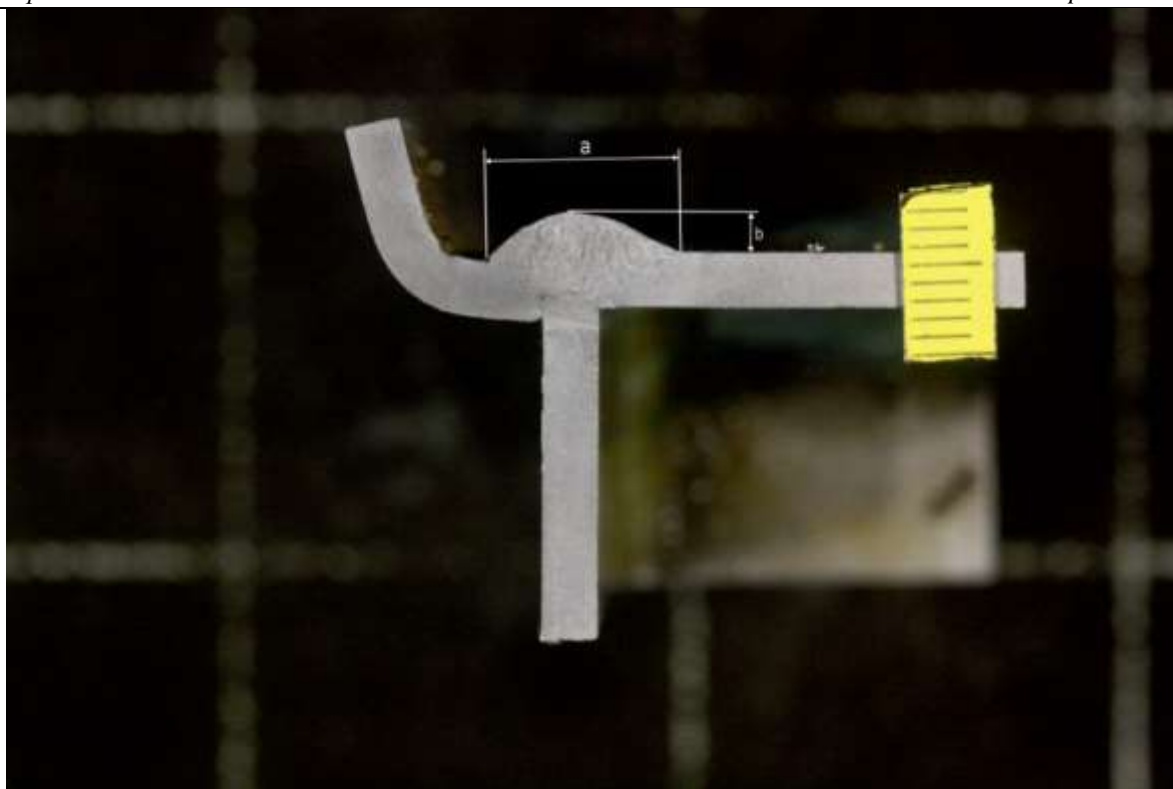


Slika 33 Makroizbrusak - uzorak 1 (FSB)

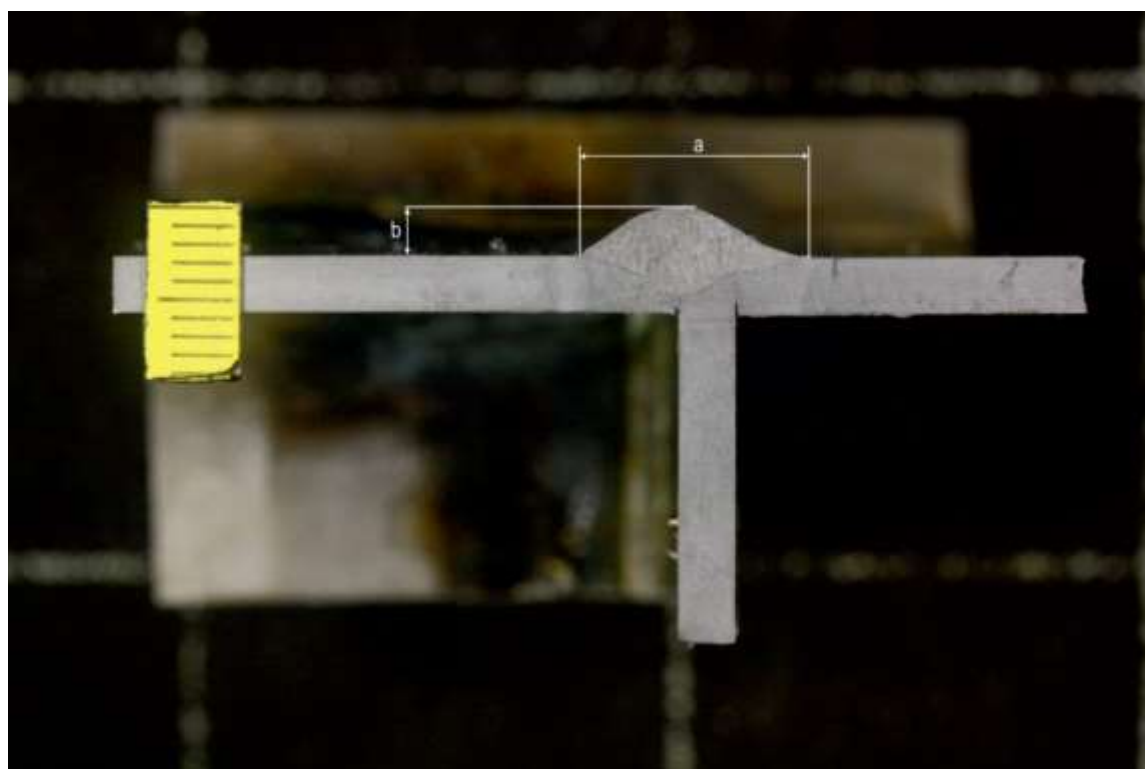


Slika 34 Makroizbrusak - uzorak 2 (TEP)

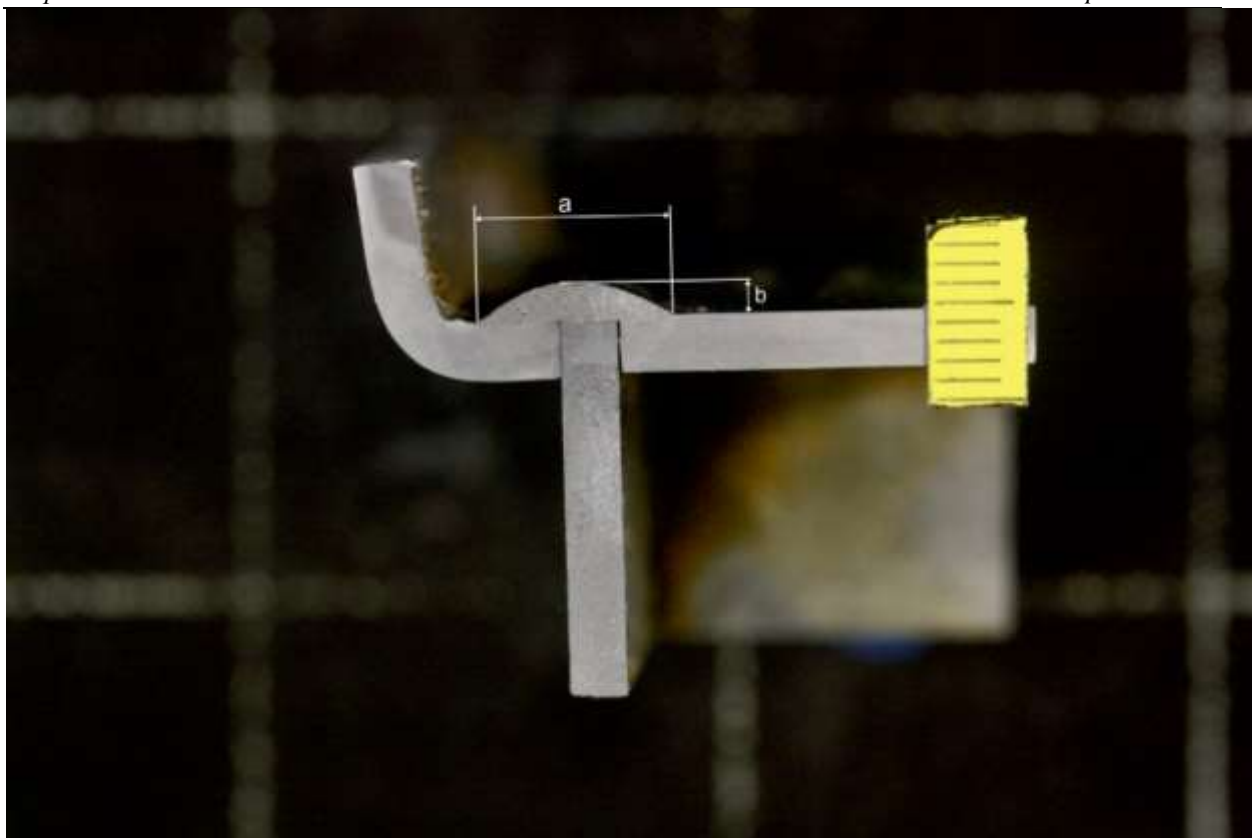
Makroizbrusci su na strojnoj pili rezani tako da su dobivena po dva poprečna presjeka na svakom uzorku. Presjeci zavara, s kotiranim nadvišenjem i širinom spoja, prikazani su sljedećim slikama. Na slikama 35. i 36. uzorak 1, zavaren na FSB-u, a na slikama 37. i 38. uzorak 2, zavaren u TEP-u. Širina i nadvišenje svakog spoja izmjereni su uporabom programa ImageJ, a rezultati su prikazani u tablici 7.



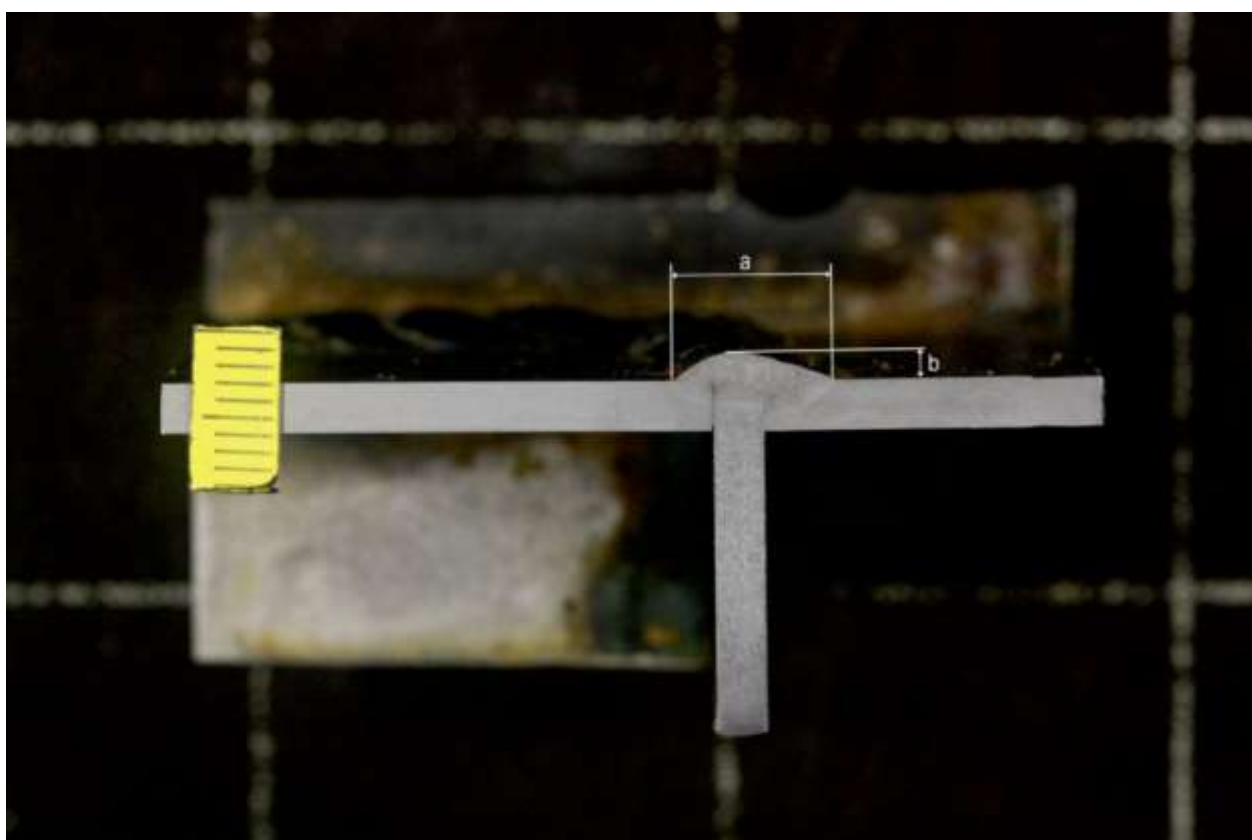
Slika 35 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 1, presjek 1



Slika 36 Makroizbrusak presjeka zavara, uzorak 1, presjek 2



Slika 37 Makroizbrusak presjeka zavora, uzorak 2, presjek 1

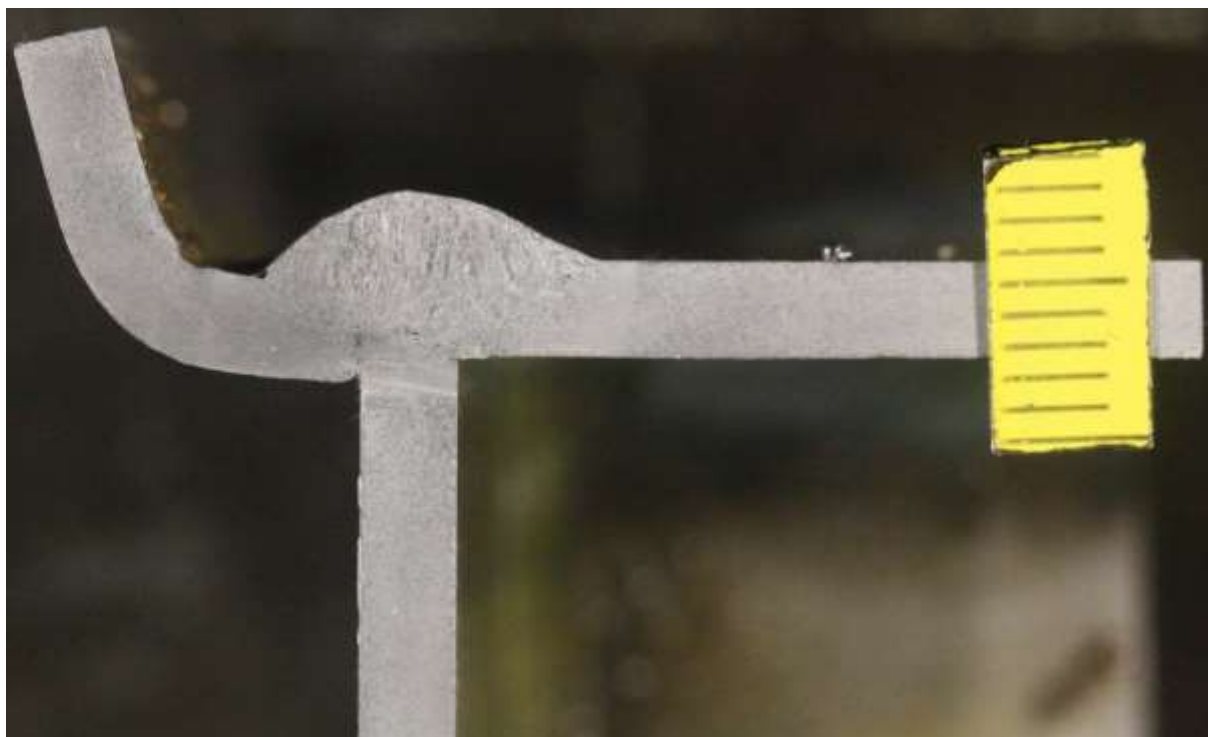


Slika 38 Makroizbrusak presjeka zavora, uzorak 2, presjek 2

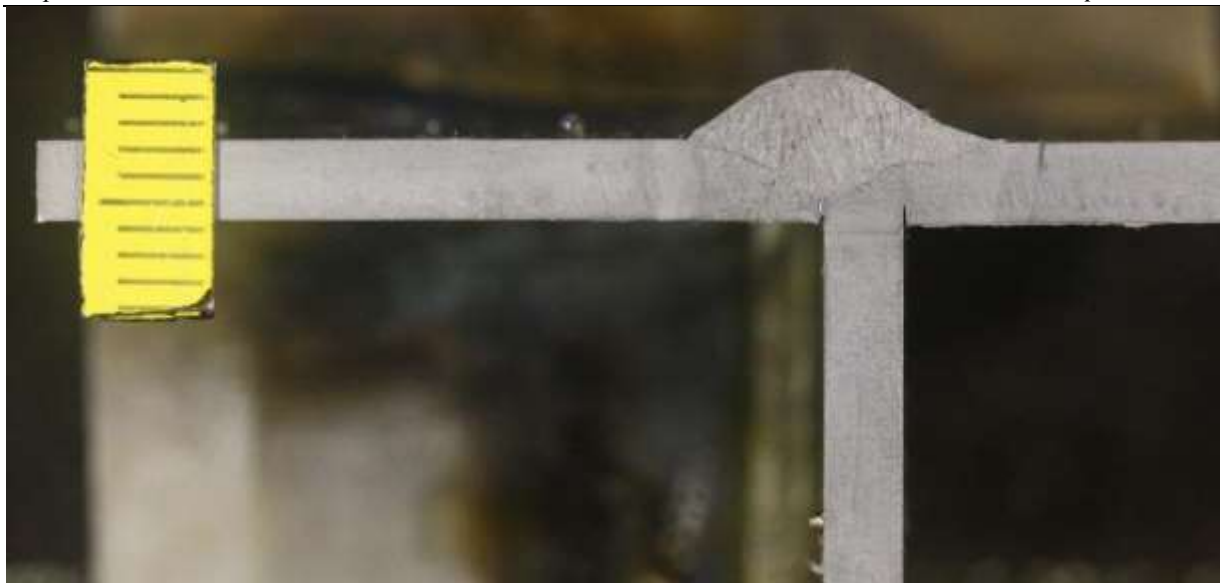
Tablica 7 Geometrijske značajke makroizbrusaka

Uzorak	a, mm	b, mm	Slika
1a	10,71	2,20	35.
1b	12,07	2,61	36.
2a	10,04	1,9	37.
2b	9,41	1,58	38.

Promatranjem presjeka makroizbrusaka provedena je geometrijska analiza zavarenih spojeva. Presjeci makroizbruska uzorka 1 vidljivi su pobliže na slikama 39. i 40., a uzorka 2 na slikama 41. i 42.

**Slika 39 Uzorak 1, presjek 1**

Na jednom dijelu presjeka nije ostvaren dovoljan provar, radi nedovoljne penetracije. Uzrok tome može biti nepravilna tehnika rada, nepravilna priprema spoja ili neispravno postavljene parametri, najčešće premala jakost struje ili prevelika brzina zavarivanja.



Slika 40 Uzorak 1, presjek 2

Kao na prvom presjeku uzorka 1, ni na drugom presjeku nije ostvarena dovoljna penetracija. Zavar je djelomično smaknut. Uslijed nedovoljne penetracije nije ostvaren dovoljan provar.



Slika 41 Uzorak 2, presjek 1

Na presjeku prikazanom slikom 41. nema penetracije u osnovni materijal, te je došlo do naljepljivanja. Talina dodatnog materijala samo je nalegla na nerastaljeni osnovni materijal, te nije postignuta čvrsta strukturna veza između osnovnog i dodatnog materijala. U dinamički opterećenim konstrukcija ovakva greška je nedopustiva. Uočena je i jedna pora u presjeku. U sučeljeno zavarenim spojevima, pojedinačne pore kuglastog oblika nemaju značajnog utjecaja

na čvrstoću spoja, ali negativno djeluju na čvrstoću ukoliko su otvorene prema površini. Više pojedinačnih pora može se povezati i stvoriti pukotinu, posebice kada su u blizini.



Slika 42 Uzorak 2, presjek 2

Na drugom presjeku uzorka 2 došlo je do vrlo male penetracije u osnovni materijal, ali samo djelomično. Vidljivo je i mjestimično naljepljivanje bez ostvarene penetracije.

Iz tablice 7. moguće je uočiti da su nadvišenje i širina zavara veće na presjecima makroizbruska uzorka 1, a sa slika 39.-42. da je na uzorku 1 ostvarena bolja penetracija i došlo je do pojave manjih i manje ozbiljnih grešaka u zavarenom spoju. Iako nijednom od dviju propisanih tehnologija zavarivanja ovoga spoja nije ostvaren potpuno zadovoljavajući rezultat, na uzorku 1 parametri su bili u redu, samo treba poraditi na pozicioniranju pištolja.

5.10. Ispitivanje tvrdoće

Nakon geometrijske analize makroizbrusaka, bilo je potrebno ispitati tvrdoću u zoni zavara, u zoni utjecaja topline i u osnovnom materijalu.

Usprkos činjenici da tvrdoća nije fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće često je primjenjivan postupak pri ispitivanju mehaničkih svojstava, jer je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima poput npr. vlačne čvrstoće R_m , a jednostavnije i brže je provesti ispitivanje tvrdoće nego nekih drugih mehaničkih svojstava [24].

Tri su osnovne metode ispitivanja tvrdoće: Brinellova, Vickersova i Rockwellova. Za ispitivanje tvrdoće u sklopu ovog rada korištena je Vickersova metoda. Ispitivanje je

provedeno pomoću uređaja prikazanog na slici 43., koji sadrži dio sa indentorom, u obliku istostrane četverostrane piramide s kutem između stranica 136° , i mjernog mikroskopa.

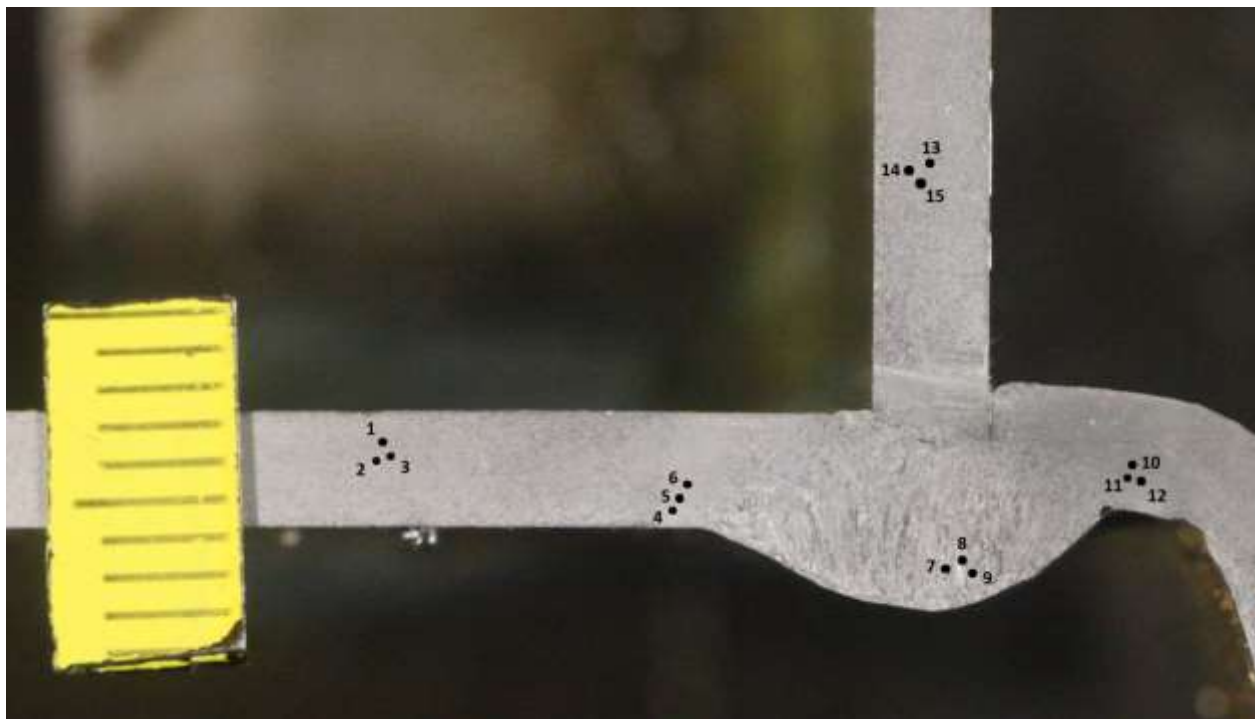


Slika 43 Uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Vickersu

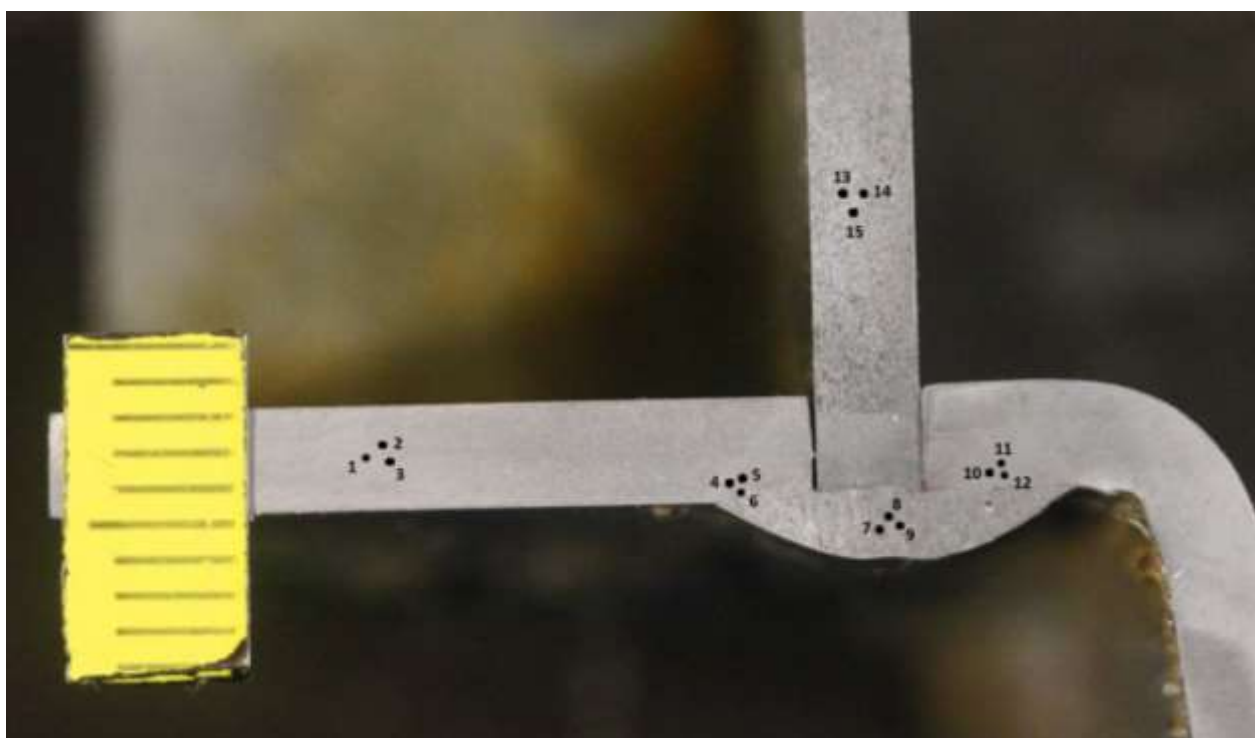
Ispitivanje je provedeno na način da je indentor utiskivan u materijal na mjestima gdje je bilo potrebno izmjeriti tvrdoću, nakon čega u materijalu ostaje otisak koji se vidi kao pravokutnik pod mikroskopom. O tvrdoći se zaključuje na osnovi veličine otiska, tako što se promatranjem pod mjernim mikroskopom mjeri duljina dijagonale pravokutnika. Materijal je općenito veće tvrdoće što je manji otisak koji je ostao u materijalu, odnosno što je manja duljina dijagonale pravokutnika. Na temelju izmjerene duljine dijagonale, iz tablice se očitava vrijednost tvrdoće na mjestu mjerenja.

Tvrdoća je mjerena na oba uzorka, u 15 točaka na svakom. Od toga je bilo šest mjerenja u osnovnom materijalu, šest u zoni utjecaja topline te tri u području zavora. Točke u kojima je mjerena tvrdoća na makroizbruscima uzoraka 1 i 2, prikazane su slikama 44. odnosno 45.,

Rezultati mjerenja dani su u tablici 7. za uzorak 1, zavaren na FSB-u, i tablici 8. za uzorak 2, zavaren u TEP-u.



Slika 44 Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku uzorka 1



Slika 45 Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku uzorka 2

Tablica 8 Rezultati ispitivanja tvrdoće na uzorku 1

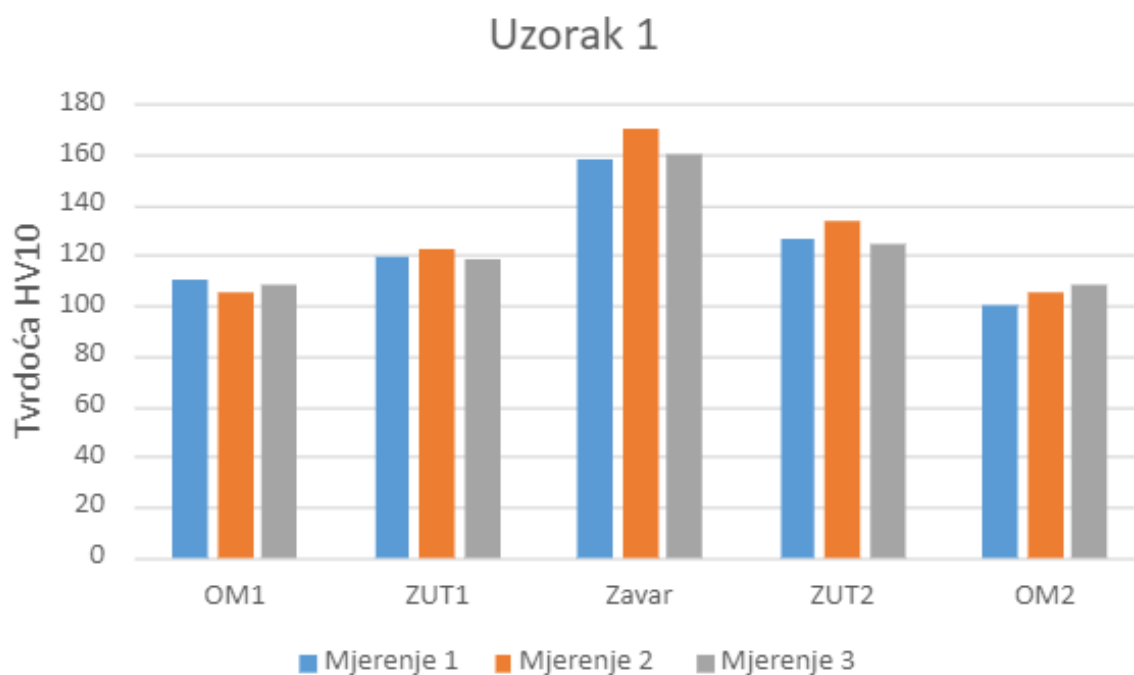
Pozicija	Točka	Izmjerena tvrdoća, HV10
Osnovni materijal 1	1	110
	2	105
	3	108
ZUT 1	4	119
	5	123
	6	118
Zavar	7	158
	8	170
	9	160
ZUT 2	10	127
	11	134
	12	125
Osnovni materijal 2	13	100
	14	105
	15	108

Tablica 9 Rezultati ispitivanja tvrdoće na uzorku 2

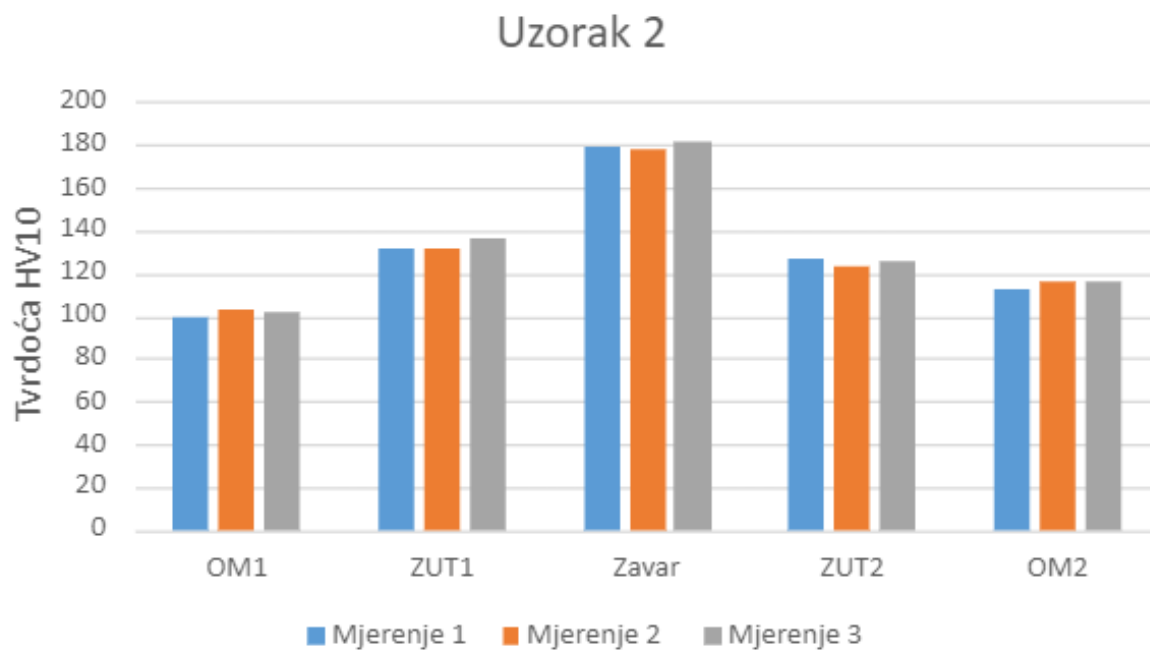
Pozicija	Točka	Izmjerena tvrdoća, HV10
Osnovni materijal 1	1	100
	2	103
	3	102
ZUT 1	4	131
	5	131
	6	136
	7	179

Zavar	8	178
	9	181
ZUT 2	10	127
	11	123
	12	125
Osnovni materijal 2	13	113
	14	116
	15	116

Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće dan je slikama 46. i 47. Iz grafova se da uočiti da je na oba uzorka najmanja vrijednost tvrdoće mjerena u osnovnom materijalu, veće vrijednosti javile su se u ZUT-u, a najveće u području metala zavara, što je bilo očekivano. Uslijed taljenja materijala i njegovog ponovnog skrućivanja u ZUT-u i metalu zavara došlo je do strukturnih promjena i pojave tvrdih mikrostrukturnih faza u odnosu na osnovni materijal.



Slika 46 Izmjerene vrijednosti tvrdoća na uzorku 1



Slika 47 Izmjerene vrijednosti tvrdoća na uzorku 2

6. ZAKLJUČAK

Pri izboru materijala za okvir električnog bicikla vrlo je bitno da materijal ima odgovarajuća mehanička svojstva poput čvrstoće i krutosti, kako bi podnio sile nametnute tijekom vožnje, bez pojave deformacije i loma. Okvir bicikla sastoji se od više pojedinačnih dijelova, koje je potrebno spojiti zavarivanjem. S obzirom na odabrani materijal za izradu okvira i dijelove koje treba spojiti zavarivanjem, potrebno je odabrati odgovarajući postupak, kao i odgovarajuću tehnologiju koja će ispuniti tražene zahtjeve. Dodatni materijal potrebno je odabrati sukladno osnovnom materijalu te mora imati bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala kako bi se osigurala čvrstoća na zavarenim mjestima veća od čvrstoće na mjestima osnovnog materijala.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada odabran je jedan kritični spoj za koji je bilo potrebno propisati tehnologiju zavarivanja. Spoj je zavaren u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u (uzorak 1) impulsnim MAG postupkom zavarivanja. Isti taj spoj izveden je u TEP-u (uzorak 2), gdje će se proizvoditi okviri za električni bicikl Thor, MAG postupkom zavarivanja uz prijenos metala kratkim spojevima i različite procesne parametre.

Nakon zavarivanja provedena je vizualna kontrola spojeva i uočeno je da je kvaliteta zavara izvedenog na FSB-u znatno bolja. Na spoju zavarenom u TEP-u došlo je do prekomjernog rasprskavanja, širina lica zavara i površina zavara bile su vrlo neravnomjerne, te su vidljive pore na površini zavara. Zatim je provedeno nerazorno ispitivanje, penetrantskom metodom. Na uzorku 1 razvila se jedna indikacija, dok je velik dio površine uzorka 2 poprimio crvenu boju, što ukazuje na prisutnost pora i pukotina u spoju. Razlog tome može biti primjena neispravnih parametara zavarivanja, nepravilna tehnika rada, neiskustvo i loša obuka zavarivača.

Zatim su iz oba uzorka izrađeni makroizbrusci. Svaki uzorak izrezan je tako da su dobivena po dva poprečna presjeka zavarenog spoja. Provedena je geometrijska analiza spojeva. Na oba presjeka prvog uzorka uočeno je da nije došlo do provara korijena, radi nedovoljne penetracije. Razlog tome je najčešće premala struja zavarivanja ili prevelika brzina zavarivanja. Na presjecima drugog uzorka došlo je do naljepljivanja rastaljenog dodatnog materijala na nerastaljeni osnovni materijal. Na jednom od dvaju presjeka nije došlo do penetracije, dok je na drugom presjeku penetracija minimalna. Pojavila se i jedna pora u presjeku.

Naposljetku je provedeno ispitivanje tvrdoće prema Vickersu. Tvrdoća je na makroizbruscima mjerena u više točaka, u osnovnom materijalu, ZUT-u i metalu zavara. Došlo je do povećanja tvrdoće u ZUT-u i metalu zavara, u odnosu na osnovni materijal, što je bilo očekivano. Pritom su najveće vrijednosti tvrdoće na oba uzorka mjerene u metalu zavara. Do povećanja tvrdoće u ZUT-u i metalu zavara dolazi jer su to područja zahvaćena mikrostrukturnim promjenama kao posljedica zavarivanja.

U oba spoja javile su se pogreške, što može biti posljedica loše opreme, neadekvatne tehnologije, pogrešnog izbora parametara, loše tehnike rada, loše pripreme spoja, loše obuke zavarivača itd. Neke od grešaka koju su se javile, kao što su poroznost, nedovoljna penetracija i naljepljivanje vrlo su česte kod MAG postupka zavarivanja.

Uzevši u obzir rezultate provedenih ispitivanja zaključeno je da sa nijednom od dviju tehnologija korištenih za zavarivanje ovoga spoja limova nije postignut zadovoljavajuć rezultat. Međutim, spoj zavaren na FSB-u pokazao se znatno boljim. Glavni problem koji se pojavio u tom spoju je nedovoljna penetracija. Povećanjem struje zavarivanja ili smanjenjem brzine zavarivanja ova pogreška bi se mogla izbjeći.

Nemoguće je potpuno ukloniti pogreške u zavarenim spojevima, ali moguće ih je svesti na minimum. Zato je potrebno opširno znanje o procesu zavarivanja i o samim greškama kako bi ih se pokušalo spriječiti i kako bi se ostvarila zahtjevana kvaliteta zavarene konstrukcije.

7. LITERATURA

- [1] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
- [2] Kralj, Kožuh, Andrić: Zavarivački i srodni postupci, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] Jovan, V.: Tehnologija izrade rame električnog bicikla, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2017.
- [4] Filetin, Kovačiček, Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [5] Rontescu, C., Cicici, T.D., Amza, C. G., Chivu, O., Dobrota, D.: Choosing the Optimum Material for Making a Bicycle Frame, Polytechnic University of Bucharest, Romania, 2015.
- [6] <https://off.road.cc/content/feature/the-ultimate-guide-to-frame-materials-whats-best-for-bikes-664>, dostupno 05.03.2022.
- [7] <https://bicikl.bikegremlin.com/12003/materijali-ramova-bicikla-objasnjeni/>, dostupno 05.03.2022.
- [8] <https://www.cube.eu/cube-bikes/>, dostupno 08.03.2022.
- [9] <https://eieek.com.ua/>, dostupno 08.03.2022.
- [10] <https://vectorebike.com/>, dostupno 08.03.2022.
- [11] <https://www.fabemametalni.hr/katalog/hladno-valjani-limovi/>, dostupno 11.03.2022.
- [12] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/celik.pdf>, dostupno 11.03.2022.
- [13] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [14] Predavanje iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“ – „Izvori struje za zavarivanje“, Katedra za zavarene konstrukcije, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [15] Juras, M.: Parametrizacija senzora električnog luka pri MAG robotiziranom zavarivanju, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [16] Torer, I. : Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [17] Fuš, H.: Skripta – Zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2016.
- [18] Oberšmit, E.: Osnove konstruiranja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1991.
- [19] <https://servus.hr/proizvodi/zavarivanje/welbee-p-400/>, dostupno 14.03.2022.

- [20] <https://www.gneppgi.com/cold-rolled-steel/dc01-cold-rolled-steel-sheet.html>, dostupno 15.03.2022.
- [21] <https://www.ezg.hr/zice.html>, dostupno 15.03.2022.
- [22] HRN EN 1011-1:2009 - Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje (EN 1011-1:2009)
- [23] Predavanja iz kolegija „Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [24] Ivušić, Franz, Španiček, Čurković: Materijali 1, četvrto izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.