

Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija

Sinanović, Adnan

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:790543>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Adnan Sinanović

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Adnan Sinanović

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. Ing., asistentu dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. stroj. na stručnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada. Također se zahvaljujem djelatnicima laboratorija za zavarivanje na pomoći u izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom čitavog studija.

Adnan Sinanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ADNAN SINANOVIĆ** Mat. Br.: **0035172307**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA KERAMIČKIH PODLOGA KOD MIG ZAVARIVANJA ALUMINIJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF CERAMIC BACKING IN MIG WELDING OF ALUMINIUM**

Opis zadatka:

Detaljno razraditi primjenu MIG postupka kod zavarivanja aluminija. Opisati način odabira opreme, parametara, dodatnih materijala i zaštitnih plinova. Klasificirati vrste keramičkih podloga te prikazati primjenu pri zavarivanju, posebno u brodogradnji. Analizirati pripremu spojeva za zavarivanje aluminija prema normi HRN EN ISO 9692-3. Usporediti način izvođenja zavarenih spojeva aluminijskih legura sa i bez primjene keramičke podloške.

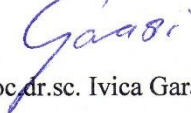
U eksperimentalnom dijelu potrebno je načiniti komparativnu analizu zavarivanja sučeljenog spoja sa i bez primjene keramičke podloge. Definirati tehnologije za oba slučaja uz obaveznu primjenu MIG impulsnog zavarivanja. Provesti potrebna ispitivanja prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2. Analizirati dobivene rezultate sa stanovišta mehaničkih svojstava i troškova. Zaključno predložiti optimalnu tehnologiju MIG zavarivanja aluminijskih sučeljenih spojeva.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2016.

Predvideni datum obrane:
13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadan:


Doc.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. ALUMINIJ	2
2.1. Tehnički aluminij.....	3
2.2. Aluminijske legure	3
3. MIG ZAVARIVANJE	6
3.1. Konvencionalno MIG zavarivanje.....	7
3.2. Prijenos metala kod konvecnionalnog MIG zavarivanja.....	12
3.2.1. Prirodni prijenos metala	14
3.2.2. Kontrolirani prijenosi metala	23
3.2.3. Prijenosi metala koji se odvijaju izmjenično.....	24
3.3. Impulsno MIG zavarivanje.....	25
3.3.1. Parametri kod MIG impulsnog zavarivanja	26
4. ZAVARLJIVOST ALUMINIJSKIH MATERIJALA	29
4.1. Utjecaj topline na zavarivanje	29
4.2. Tople pukotine	30
4.3. Poroznost	31
4.4. Utjecaj toplinske vodljivosti	32
4.5. Utjecaj Al oksida	33

5. MIG ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH MATERIJALA	34
5.1. Izbor osnovnih parametara zavarivanja	34
5.2. Duljina slobodnog kraja žice	34
5.3. Tehnike rada	35
5.4. Izbor vrste i količine zaštitnog plina.....	36
6. PODLOGE ZA ZAVARIVANJE	38
7. HRN EN ISO 9692-3	40
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	43
8.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada	44
8.1.1. Izvor struje.....	45
8.1.2. Specifikacija osnovnog materijala AlMg4,5Mn	46
8.1.3. Specifikacija dodatnog materijala	47
8.1.4. Podloga za zavarivanje	48
8.2. Zavaarivanje uzoraka.....	49
8.3. Nerazorno ispitivanje penetrantima.....	53
8.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva	56
8.4.1. Statičko vlačni pokus	57
8.4.2. Ispitivanje savijanjem.....	60
8.5. Makro analiza i geometrija zavara.....	63
8.6. Mikroskopska analiza	66
9. ZAKLJUČAK	69
LITERATURA.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz zavarivanja taljivom metalnom elektrodom [4]	6
Slika 2.	Odnos vanjske karakteristike izvora struje i brzine žice [6]	8
Slika 3.	Shema zavarivanja kod MIG/MAG postupka [11]	9
Slika 4.	Prikaz pronalaženja optimalne radne točke za MIG zavarivanje [12]	11
Slika 5.	Ponašanje struje i napona prilikom zavarivanja MIG postupkom kratkim lukom (kratkim spojevima) [8]	13
Slika 6.	Dijagram prikaza prijenosa materijala U_a-I_w [8]	17
Slika 7.	Dijagram prikaza prijenosa metala L_a-I_w [8]	18
Slika 8.	Izmjenični luk iz mješovitog u štrcajući [8]	25
Slika 9.	Idealan oblik vremenskog toka struje kod tranzistorskih izvora [1]	26
Slika 10.	Oblici impulsa [6]	28
Slika 11.	Zone unutar zavara [14]	29
Slika 12.	Utjecaj legirajućih elemenata na osjetljivost na tople pukotine [16]	30
Slika 13.	Topljivost vodika na različitim temperaturama u aluminiju [17]	32
Slika 14.	Primjeri nagiba pištolja kod MIG poluautomatskog zavarivanja [20]	35
Slika 15.	Izgled zavara pri korištenju različitih plinova [21]	36
Slika 16.	Privremene podloge za zavarivanje [27]	38
Slika 17.	Konkavnost korijena zavara [30]	39
Slika 18.	Pukotine i uključci oksida uzrokovani konkavnošću korijena [29]	39
Slika 19.	Uzorak za zavarivanje sučelnog spoja sa potpunom penetracijom [31]	43
Slika 20.	Stanica za zavarivanje u Laboratoriju za zavarivanje FSB	44
Slika 21.	Izvor struje za zavarivanje Welbee P400 u Laboratoriju za zavarivanje FSB	45
Slika 22.	Keramička podloga	48
Slika 23.	Skica presjeka keramičke podloge	48
Slika 24.	Lice zavara uzorka A	51
Slika 25.	Korijen zavara uzorka A	52
Slika 26.	Lice zavara uzorka B	52
Slika 27.	Korijen zavara uzorka B	53
Slika 28.	Lice zavara uzorka A nakon ispitivanja penetrantima	54
Slika 29.	Korijen zavara uzorka A nakon ispitivanja penetrantima	54
Slika 30.	Lice zavara uzorka B nakon ispitivanja penetrantima	55
Slika 31.	Korijen zavara uzorka B nakon ispitivanja penetrantima	55

Slika 32.	Mjesta za vađenje ispitnih uzoraka iz zavarenog spoja	56
Slika 33.	Dimenzije epruvete za statičko vlačni pokus	57
Slika 34.	Kidalica WPM EU 40 MOD	57
Slika 35.	Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja	58
Slika 36.	Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja	58
Slika 37.	Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	58
Slika 38.	Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	59
Slika 39.	Ispitivanje savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje FSB.....	60
Slika 40.	Dimenzije uprute za savijanje	60
Slika 41.	Stroj za poliranje ispitnih uzoraka	63
Slika 42.	Skica veličine zavara.....	64
Slika 43.	Mikroskopska analiza uzorka A.....	66
Slika 44.	Mikroskopska analiza uzorka B	67

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Svojstva aluminijska [1]	2
Tablica 2.	Mehanička svojstva aluminijskih legura [3]	5
Tablica 3.	Ovisnost potrošnje plina o promjeru žice [12]	10
Tablica 4.	Prirodni prijenos materijala kod elektro-lučnog zavarivanja pod zaštitom plina [8] 15	
Tablica 5.	Utjecaj Ar i He na svojstva zavara [16]	37
Tablica 6.	Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [22]	41
Tablica 7.	Tehničke specifikacije Welbee P400 [23]	45
Tablica 8.	Mehanička svojstva osnovnog materijala [24]	46
Tablica 9.	Kemijski sastav osnovnog materijala [24]	46
Tablica 10.	Mehanička svojstva dodatnog materijala [24, 25]	47
Tablica 11.	Kemijski sastav dodatnog materijala [26]	47
Tablica 12.	Specifikacija postupka zavarivanja uzorka A	49
Tablica 13.	Specifikacija postupka zavarivanja uzorka B	50
Tablica 14.	Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja	59
Tablica 15.	Rezultati savijanja Uzorka A	61
Tablica 16.	Rezultati savijanja uzorka B	62
Tablica 17.	Kellerov reagent	63
Tablica 18.	Oznake mjerenih veličina zavara	64
Tablica 19.	Makroizbrusci uzoraka	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
Al	Aluminij
Cu	Bakara
Mg	Magnezij
Si	Silicij
Zn	Cink
Mn	Mangan
Fe	Željezo
Mg ₂ Si	Magnezij silicid
Al ₂ O ₃	Aluminijev dioksid
HNO ₃	Dušična kiselina
HCl	Klorovodična kiselina
HF	Fluorovodik
CO ₂	Ugljikov dioksid
Ar	Argon
He	Helij
R _m	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]
F _m	Prekidna sila [N]
Q	Unos topline [kJ/mm]
η	Stupanj iskoristivosti [%]
v _z	Brzina zavarivanja [mm/min]
v _ž	Brzina dodavanja žice [m/min]
v _{tž}	Brzina taljenja žice [m/min]
K	Konstanta taljenja [g/(A×min)]
I	Jakost struje [A]
F	Poprečni presjek [mm ²]
γ	Gustoća [kg/m ³]
I _w	Struja zavarivanja [A]
U _w	Napon zavarivanja [V]

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi aktivnog plina
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
IIW	Međunarodni institut za zavarivanje

SAŽETAK

Tema ovog rada je „Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija“. Sastoji se od dva dijela, teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu objašnjen je MIG impulsni postupak zavarivanja, prijelaz metala u električnom luku i odabir parametara i opreme za zavarivanje. Objašnjena je uloga i primjena podloga za zavarivanje. Dan je pregled norme HRN EN ISO 9692-3 i usporedba izvođenja zavarenih spojeva prema toj normi.

U eksperimentalnom dijelu zavareni su spojevi od aluminijske legure sa i bez keramičke podloge uz pripremu spojeva sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 i primjenom MIG impulsnog načina zavarivanja. Provedena su ispitivanja zavarenih spojeva te je donešen zaključak na temelju dobivenih rezultata.

Ključne riječi: Zavarljivost aluminija, MIG impulsno zavarivanje, podloge za zavarivanje, norma HRN EN ISO 9692-3

SUMMARY

The topic of this paper is „Application of ceramic backing in MIG welding of aluminium“. It is comprised of two parts, theoretical and experimental.

The theoretical part describes the MIG pulse welding process, transfer of metal in the electric arc and selection of parameters and welding equipment. The role and application of backing material used in welding was given. An overview of the standard HRN EN ISO 9692-3 was given with the comparison of preparation of joints for welding according to the standard.

In the experimental part, plates made of aluminium alloy were welded, using MIG pulse technology, with and without using ceramic backing material with joint preparation according to HRN EN ISO 9692-3 standard. Testing of welded joints were conducted and a conclusion was made based on the results of testing.

Keywords: Weldability of aluminium, MIG pulse welding, backing material for welding, HRN EN ISO 9692-3 standard

1. UVOD

Aluminijske legure su metali vrlo povoljnog omjera gustoće i čvrstoće što ih čini jednim od najčešće korištenih materijala u svijetu. Aluminij je u primjenu najčešće korišten neželjezni metal. U pravilu se uvijek legira što mu omogućuje značajno povećanje mehaničkih svojstava. Proizvodi od aluminija našli su primjenu u velikom broju industrijskih grana: zrakoplovna industrija, brodogradnja, automobilska industrija, kemijsko procesna industrija, itd.

Sa sve većom potražnjom za aluminijskim materijalima razvile su se i tehnologije za njihovu obradu, uključujući spajanje tehnologijama zavarivanja. Razlika pri zavarivanju između aluminija i čelika je u velikoj osjetljivost na unos topline. Konvencionalni postupci zavarivanja se rijetko primjenjuju i zbog problema aluminijevog oksida koji se prirodno stvara na njegovoj površini i ima temperaturu taljenja tri puta veću od samog metala. Zbog toga se najčešće koristi MIG impulsni postupak zavarivanja koji uklanja te probleme, a može se koristiti i TIG u slučaju tanjih radnih komada.

Problemi koji se javljaju kod zavarivanja aluminijskih materijala su najčešće tople pukotine uzrokovane vodikom u metalu zavara. Ostali problemi mogu biti nepotpuni provar, naljepljivanje i prevelika penetracija. Zadovoljavajući zavareni spoj aluminija se postiže pravilnim odabirom parametara zavarivanja, odabirom podloga za zavarivanje, vrste i količine zaštitnog plina i odabirom adekvatnog dodatnog materijala.

2. ALUMINIJ

Aluminij je element koji se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se elektrolitskim postupkom izdvaja metal. Prvi aluminij je proizveden uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija [1]. Osnovna svojstva aluminija navedena su u Tablici 1.

Tablica 1. Svojstva aluminija [1]

Gustoća	kg/m ³	2700
Talište	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm ²	69000
Toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	23.8
Električna vodljivost	m/Ωmm ²	36 – 37,8
Granica razvlačenja	N/mm ²	20-120
Vlačna čvrstoća	N/mm ²	40-180
Istezljivost	%	4-50

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala [1]:

- Povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji ali i za druge namjene.
- Omjer električne vodljivosti i gustoće je najpovoljniji među svim metalima.
- Aluminij ima visok afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je relativno velika

2.1. Tehnički aluminij

Nelegirani aluminij se koristi uglavnom zbog male gustoće i ponajprije njegove korozijske postojanosti i zbog estetskih razloga. Prema položaju u nizu elektrokemijskih potencijala metala, aluminij nije plemenit metal. Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju gustog neporopnog oksidnog filma koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Ukoliko se oksidni sloj ošteti, odmah se oksidacijom zamjenjuje novim. Što je jače oksidiran, to je nastali sloj otporniji, tako da je aluminij otporan i na dušičnu kiselinu. Prirodni oksidni sloj je debeo oko 4 nm i pun sitnih pora. Zbog teškoća rafinacije sirovog aluminijskog legirani aluminij trgovačke kvalitete sadrže najčešće oko 99,0 % metala. Specijalnim postupcima pročišćivanja može se dobiti aluminij čistoće 99,99 % i više, ali uz visoku cijenu. Zbog malog modula elastičnosti nosači izrađeni od aluminijskog legirani aluminij znatno su gipkiji u usporedbi sa čeličnim konstrukcijama. Isto vrijedi i za toplinsku rastezljivost koja je dvostruko nego kod čelika [1].

Najbolju korozivnu postojanost ima najčistiji aluminij te se zbog toga on upotrebljava za platiniranje neotpornijih aluminijskih legura, posebno visokočvrstih i precipitacijski očvršćenih koje sadrže magnezij, silicij ili bakar. Zbog toga što je čisti aluminij relativno mekan s niskom vlačnom čvrstoćom, on se za inženjersku primjenu u pravilu upotrebljava u legiranom stanju [1].

2.2. Aluminijske legure

Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava poput vlačne čvrstoće i tvrdoće, krutosti, rastezljivosti itd. Najvažniji legirni elementi su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn).

Prema normi EN 573 aluminijski materijali podijeljeni su u 9 skupina [2]:

- 1) Nelegirani aluminij Al (1000): U ovu skupinu spada čisti aluminij do razine tehničkog aluminijskog legirani aluminij s pratećim elementima željeza (Fe) i silicija (Si). Ti elementi povećavaju čvrstoću, a djelomično smanjuju ostala svojstva. Materijali iz ove skupine imaju najbolju električnu i toplinsku provodljivost, antikorozivnu otpornost te dobru zavarljivost.

- 2) Legure s bakrom Al-Cu (2000): Glavni legirajući element je bakar (Cu), udjelom do 5%. Bakar povećava čvrstoću, a smanjuje otpornost na koroziju i gnječilačka svojstva. Legure iz ove skupine imaju slabiju zavarljivost. Vrijednost prekidne čvrstoće iznosi 380-500 N/mm² i upotrebljavaju se za nosive dijelove konstrukcija. Ovi materijali se često prevlače čistim aluminijem zbog bolje antikorozivne zaštite.
- 3) Legure s manganom Al-Mn (3000): Sadrže manje od 1,5% Mn. Mangan povećava čvrstoću bez značajnog utjecaja na smanjenje ostalih svojstava aluminija. Ovi materijali imaju izvrsnu plastičnost i antikorozivnost te dobru zavarljivost. Vrijednost prekidne čvrstoće znosi 130-280 N/mm². Upotrebljavaju se za izradu duboko vučenih dijelova, za izmjenjivače topline i druge posude, za šavno zavarene cijevi itd.
- 4) Legure sa silicijem Al-Si (4000): Sadrže manje od 20% silicija, koji poboljšava livljivost i omogućava izradu odljevaka. Silicij snižava točku taljenja i smanjuje otpornost na koroziju.
- 5) Legure s magnezijem Al-Mg (5000): Osnovni legirni element je magnezij ali se ponekad dodaje i mangan i krom. Magnezij povećava čvrstoću i antikorozijsku otpornost na morski okoliš. Imaju srednju vrijednost čvrstoće, 130-380 N/mm², i znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. Zavarljivost je dobra.
- 6) Legure s magnezijem i silicijem Al-Mg-Si (6000): Magnezij i silicij povisuju vrijednost čvrstoće, a omogućuju očvršćivanje i toplinskom obradom. Vrijednost čvrstoće je 200-350 N/mm², imaju dobra antikorozivna svojstva te su dobro zavarljivi. Uz veći sadržaj silicija i magnezija uz dodatak mangana i kroma, imaju bolja mehanička svojstva uz veću čvrstoću. Manji sadržaj magnezija i silicija osigurava odlična svojstva oblikovanja uz lošija mehanička svojstva.
- 7) Legure s cinkom, magnezijem i bakrom Al-Zn-Mg (7000): Sadržaj cinka (Zn) je manje od 8%, sadržaj magnezija (Mg) manje od 3% i za bakar također manje od 3%. Ti elementi znatno povećavaju čvrstoću. Imaju najveće vrijednosti čvrstoće, 500-700 N/mm². Imaju smanjena antikorozivna svojstva i zavarljivost.

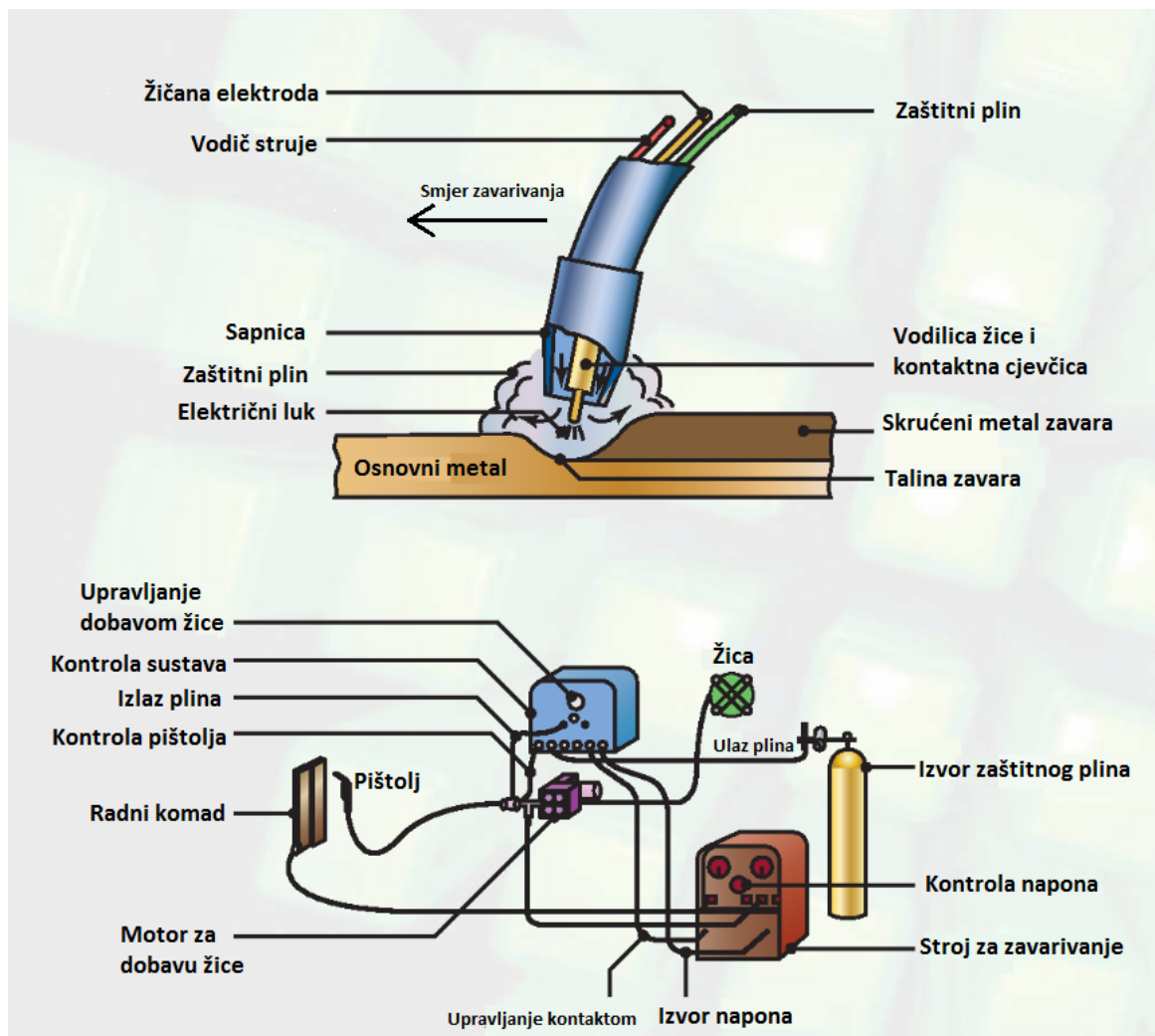
Mehanička svojstva aluminijskih legura prikazana su Tablici 2. [3]:

Tablica 2. Mehanička svojstva aluminijskih legura [3]

Legura	Serijska EN 573	Tip	Oznaka	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa
Legure koje toplinskom obradom ne očvršćavaju	1000	Al	1050 A 1070 A 1100 1200 1080	20-140	50-180
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105	50-220	120-300
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056 A 5456 5052 5005 5053 5754 5254 5182	30-320	110-380
Legure koje toplinskom obradom očvršćavaju	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017 2618 A A 2024 2219	250-500	360-530
	6000	Al-Si-Mg	6005 6060 6061 6082 6081 6106 6351	140-360	180-380
	7000	Al-Zn-Mg	7020 7021 7039	230-430	360-500
		Al-Zn-Mg-Cu	7049 A 7175 7075 7130 7475 7010 7050	350-720	440-760

3. MIG ZAVARIVANJE

MIG (engl. Metal inert Gas) zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, najčešće argon ili helij. Električni luk se uspostavlja između elektrode odnosno žice, koja je istodobno i dodatni materijal, i osnovnog materijala. Postupak može biti automatski (potpuno mehanizirano), poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje i držanje pištolja je ručno) i robotiziran [3]. Slika 1. prikazuje shematski prikaz zavarivanja taljivom metalnom elektrodom.



Slika 1. Shematski prikaz zavarivanja taljivom metalnom elektrodom [4]

Električna struja dolazi iz izvora struje koji je priključen na električnu mrežu. Struja zavarivanja dovodi se iz izvora vodičima, od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. Električna struja prolazi žicom za zavarivanje koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce kroz sapnicu pištolja gdje se na kraju upuhuje u atmosferu luka [3].

Pri poluautomatskom zavarivanju zavarivač prinese pištolj radnom komadu i pritiskom na prekidač koji se nalazi na pištolju otvara se magnetni ventil za protok zaštitnog plina. Istodobno se aktivira elektromotor za dovod žice. Prvo proteče zaštitni plin, a zatim izlazi žica. Onog trenutka kada žica dotakne radni komad, zatvori se strujni krug i uspostavlja se električni luk. Pod utjecajem električnog luka žica i osnovni materijal se tale, a zavarivač pomicanjem pištolja uz određenu tehniku rada ostavlja talinu koja se skrućuje u zavareni spoj [3].

Prilikom zavarivanja na udaljenosti većoj od 5 m od izvora struje primjenjuje se dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju radi sprječavanja gužvanja žice unutar cijevnog vodiča. Takav sistem se zove „push-pull“ i njegova primjena je bitna i na manjim udaljenostima kada se koriste tanje žice (0,6 do 0,8 mm) ili žice od mekših materijala (aluminij i njegove legure) [5].

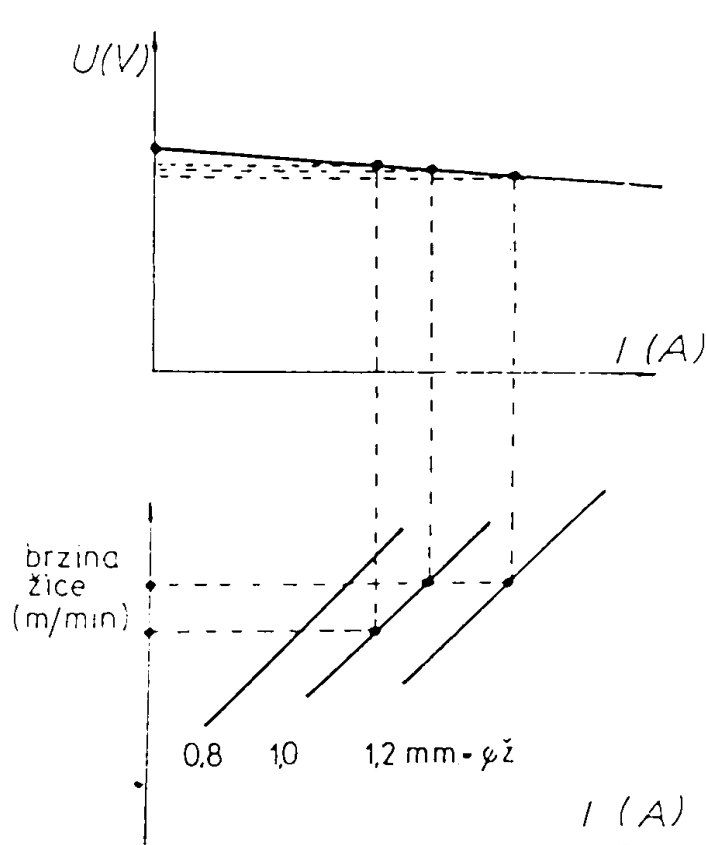
3.1. Konvencionalno MIG zavarivanje

Konvencionalno MIG zavarivanje izvodi se standardnom opremom za zavarivanje. Izvori struje mogu biti klasični, tiritorski ili tranzistorski, a samo zavarivanje se može izvoditi u svim položajima. Izvori struje za konvencionalno MIG (i MAG) zavarivanje imaju isključivo vanjsku karakteristiku konstantnog napona. Napon zavarivanja se podešava na izvoru struje izborom karakteristike, a struja zavarivanja brzinom žice. Brzina žice se određuje prema jednadžbi (1):

$$v_z = \frac{K \times I}{\gamma \times F} \quad (1)$$

- v_z – Brzina žice
 K – Konstanta taljenja, g/(A × min)
 I – Jakost struje
 γ – Gustoća, g/cm³
 F – Poprečni presjek žice, cm²

Proces će biti stabilan ako je $V_z = V_{tž}$ ($V_{tž}$ – brzina taljenja žice) [6]. Odnos između karakteristike izvora struje i brzine žice prikazan je na slici 2.

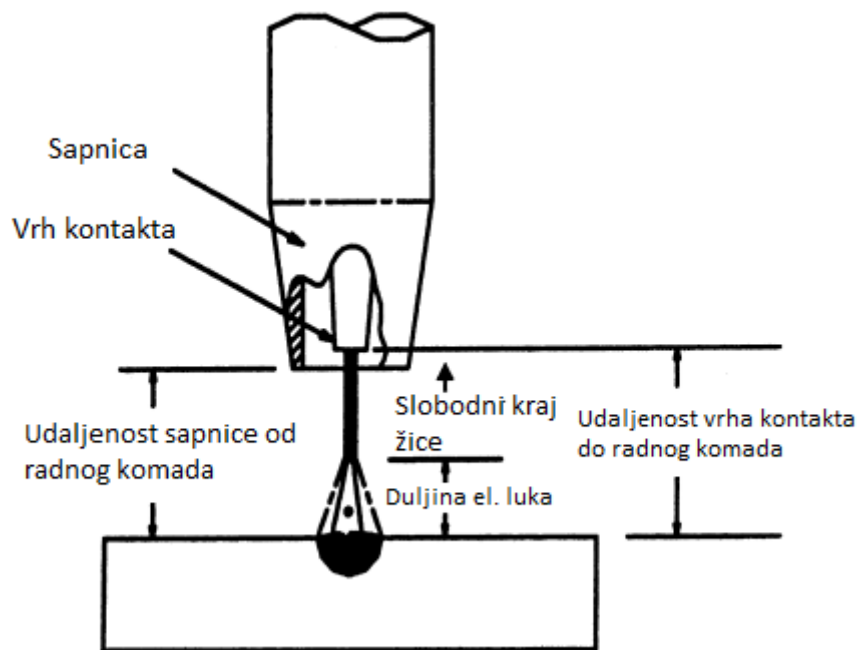


Slika 2. Odnos vanjske karakteristike izvora struje i brzine žice [6]

Parametri koji utječu na kvalitetu zavarenog spoja su [12]:

- Jakost struje zavarivanja
- Promjer žice
- Napon električnog luka
- Brzina zavarivanja
- Duljina slobodnog kraja žice
- Protok zaštitnog plina

Na slici 3. je prikazana shema zavarivanja kod MIG/MAG postupka sa prikazom nekih parametara.



Slika 3. Shema zavarivanja kod MIG/MAG postupka [11]

Jakosti struje su obično od 120 do 300 A. Kod MIG impulsnog zavarivanja dodatni parametri su i impulsna i srednja struja zavarivanja, trajanje i frekvencija impulsa. Optimalna jakost struje ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru žice odnosno dodatnog materijala. Jakost struje prilagođava se brzini dovođenja žice (veća brzina žice traži veću jakost struje). Istodobno porastom struje povećava se i penetracija i učinak taljenja zbog čega se ne preporuča prekomjerna jakost struje zavarivanja jer može doći do većeg rasprskavanja materijala tijekom zavarivanja.

Sa većim promjerom žice povećava se učinak taljenja i potrebna je veća struja zavarivanja. Veći promjer žice daje širi zavar.

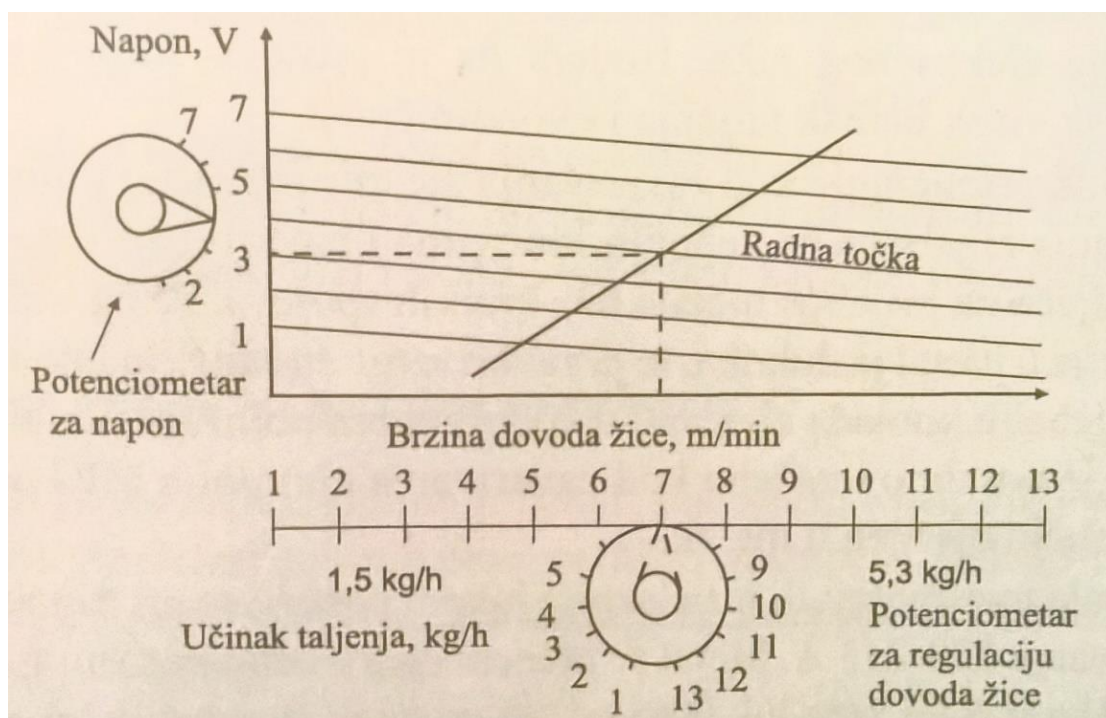
Slobodan kraj žice je duljina žice od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka, u pravilu iznosi 13 puta promjer žice (do maksimalno 20 mm). Veće odstupanje od te veličine dovodi do promjene odnosa električnog luka i struje zavarivanja. Električni otpor se povećava, a žica više zagrijava ako je slobodan kraj žice veći. Ako je sapnica preblizu radnom komadu dolazi do njenog onečišćenja, a može doći i do vrtloženja zaštitnog plina, a time i do ulaska zraka.

Protok zaštitnog plina ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Kod zavarivanja kratkim spojevima i mješovitim lukom, količina zaštitnog plina pri optimiziranoj potrošnji treba iznositi 10 puta promjer žice. Kod štrcajućeg i impulsnog luka koristi se veći protok plina [12] U tablici 3. prikazane su vrijednosti protoka plina u ovisnosti o promjeru žice.

Tablica 3. Ovisnost potrošnje plina o promjeru žice [12]

Promjer žice, mm	Potrošnja plina, l/min
0,8	6-8
1,0	9-10
1,2	10-12
1,6	14-16

Do optimalnih parametara zavarivanja dolazi se određenim redoslijedom. Prvo se odabere promjer žice, zatim područje jakosti električne struje i napona električnog luka. Uspostavom električnog luka određuje se radna točka. Nakon toga se približno odredi brzina dodatnog materijala (žice) i traži se optimalan položaj radne točke koji se odredi kada je električni luk miran i stabilan i malo rasprskavanje kapljica metala. Treba se voditi računa i o ostalim čimbenicima poput duljine slobodnog kraja žice, udaljenosti sapnice, nagib pištolja, protoku zaštitnog plina [12]. Na slici 4. je shema prikaza pronalaženja optimalne radne točke za MIG zavarivanje.



Slika 4. Prikaz pronalaženja optimalne radne točke za MIG zavarivanje [12]

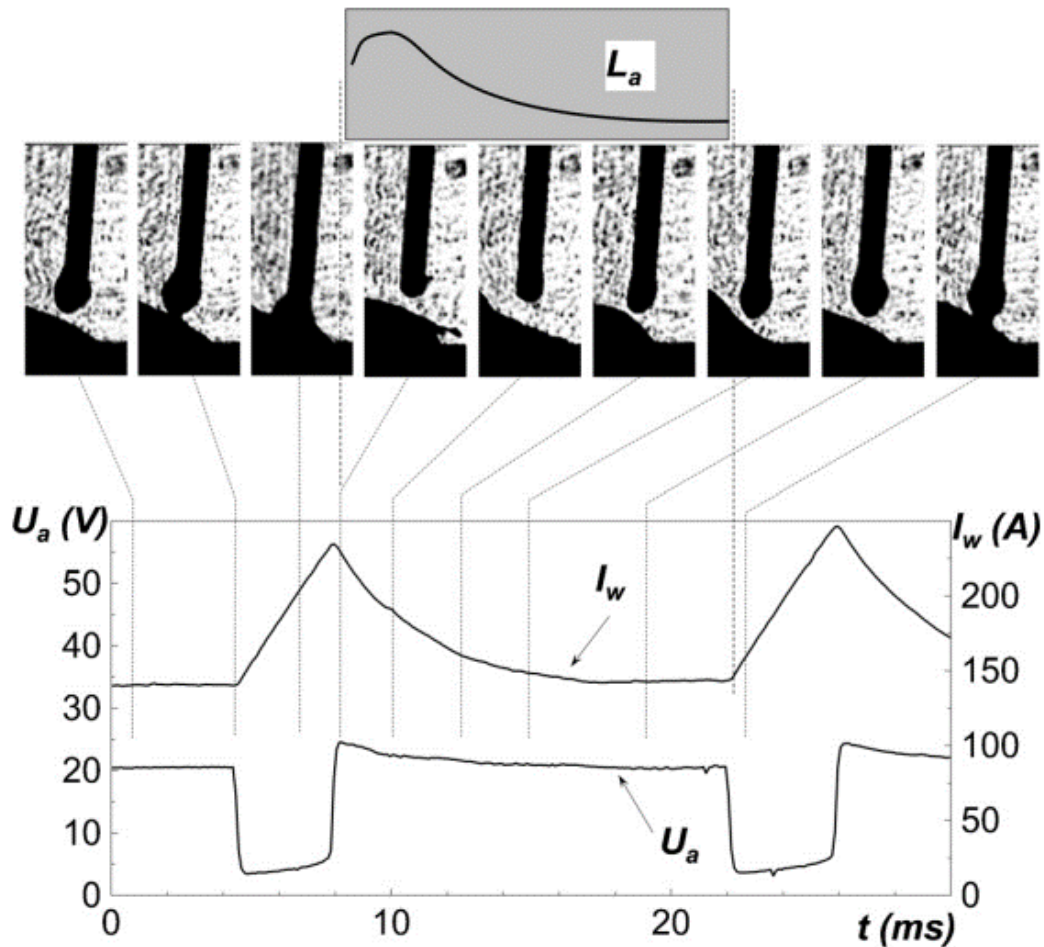
Optimalan napon električnog luka bira se na temelju jakosti struje za zavarivanje. Prenizak napon daje uzak i ispuščen zavar dok previsok napon daje širok i nizak zavar uz jako rasprskavanje i slaba mehanička svojstva zavarenog spoja. Napon električnog luka ovisi o duljini luka (veći napon za veću duljinu luka). Duljina električnog luka ustaljuje se kod izjednačavanja brzine dobave i taljenja žice. Prekomjernim porastom napona ili duljine električnog luka smanjuje se zaštita rastaljenog metala što ima za posljedicu pogoršanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja [12].

Parametri zavarivanja su struja zavarivanja, napon, induktivitet, slobodni kraj žice i drugi. Najvažniji parametar od tih je jakost struje o čijoj vrijednosti zavisi način prijenosa metala, veličina penetracije, količina rastaljenog metala, brzina zavarivanja i stabilnost električnog luka [6].

3.2. Prijenos metala kod konvencionalnog MIG zavarivanja

Kod konvencionalnog MIG zavarivanja prijenos metala u električnom luku može biti:

- **Kratki luk** – Uz male jakosti struje (50-150 A) i mali napon električnog luka (13-21 V) te mali promjer žice (0,8-1,2 mm) ostvaruje se prijenos kapljica metala kratkim spojevima uz prekidanja električnog luka. To osigurava mali unos energije zbog čega se koristi pri zavarivanju tankih materijala. Za zavarivanja aluminijskih materijala, prijenos metala kratkim lukom je nepoželjno jer kod prekidanja luka nema „čišćenja“ površine taline od oksida, a kod debljih materijala nije moguće izbjeći poroznost. Na slici 5. prikazano je ponašanje struje i napona prilikom zavarivanja MIG postupkom kratkim lukom (kratkim spojevima).



Slika 5. Ponašanje struje i napona prilikom zavarivanja MIG postupkom kratkim lukom (kratkim spojevima) [8]

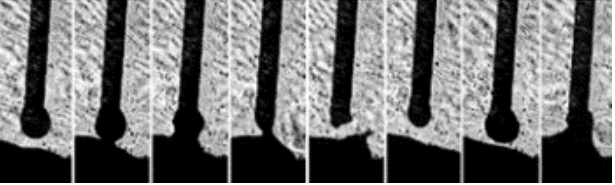

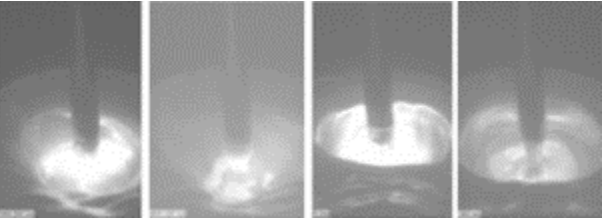
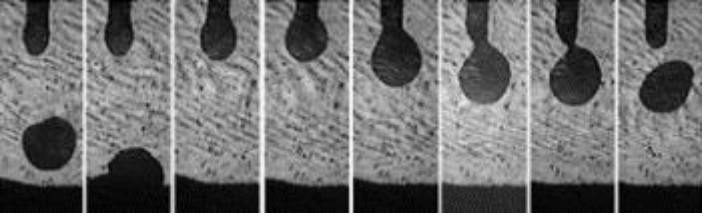
- Štrcajući luk – Štrcajućim lukom ostvaruje se prijenos metala u stinim kapljicama. Uz primjenu argona kao zaštitnog plina, to se odvija već kod relativno malih jakosti struja zavarivanja i napona luka, tako da mješoviti luk s krupnim kapljicama ne postoji. Ovim lukom se mogu zavariti deblji aluminijski materijali gdje je moguća upotreba veće jakosti struje zavarivanja.
- Mješoviti luk – prijenos metala odvija se djelomično kratkim spojevima, a djelomično se kapljice metala prenose kao kod štrcajućeg luka [7].

Ova klasifikacija prijenosa metala donesena je 1976.g od strane znanstvenika u svijetu, osobito članova međunarodnog instituta za zavarivanja (IIW, eng. International Institute of Welding). Nakon te godine razvijene su novije metode kontroliranog prijenosa metala koje ta klasifikacija ne obuhvaća specifično. Stoga je 2003. godine predloženo da se gornja klasifikacija proširi dodavanjem dva nova načina prijenosa metala, „kontrolirani prijenos“ (engl. Controlled Transfer Mode) i „prošireni operativni prijenosi“ (engl. Extended Operating Modes) dok bi stara klasifikacija bila u grupi „prirodni prijenos metala“. Mana ove klasifikacije je što ne obuhvaća zahtjeve znanstvenika pogotovo kod opisa kompleksnih procesa interakcije. Npr. dva različita načina prijenosa metala gdje se kapljice metala odvajaju različitim mehanizmima, koristeći slične parametre zavarivanja, bi bila u istoj grupi podjele. Međutim IIW je 2009.g prihvatio tu novu klasifikaciju [8].

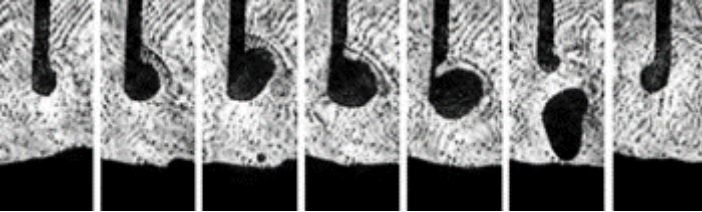
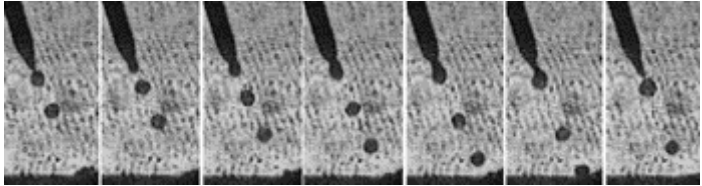
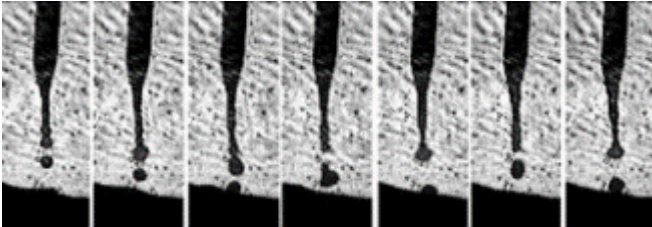
3.2.1. Prirodni prijenos metala

Načini prijenosa metala kratkim spojevima, štrcajućim lukom ili mješovitim lukom su funkcija podešenih parametara poput struje zavarivanja i napona električnog luka [8]. Ti načini prijenosa i njihove varijacije prikazane su u Tablici 4.

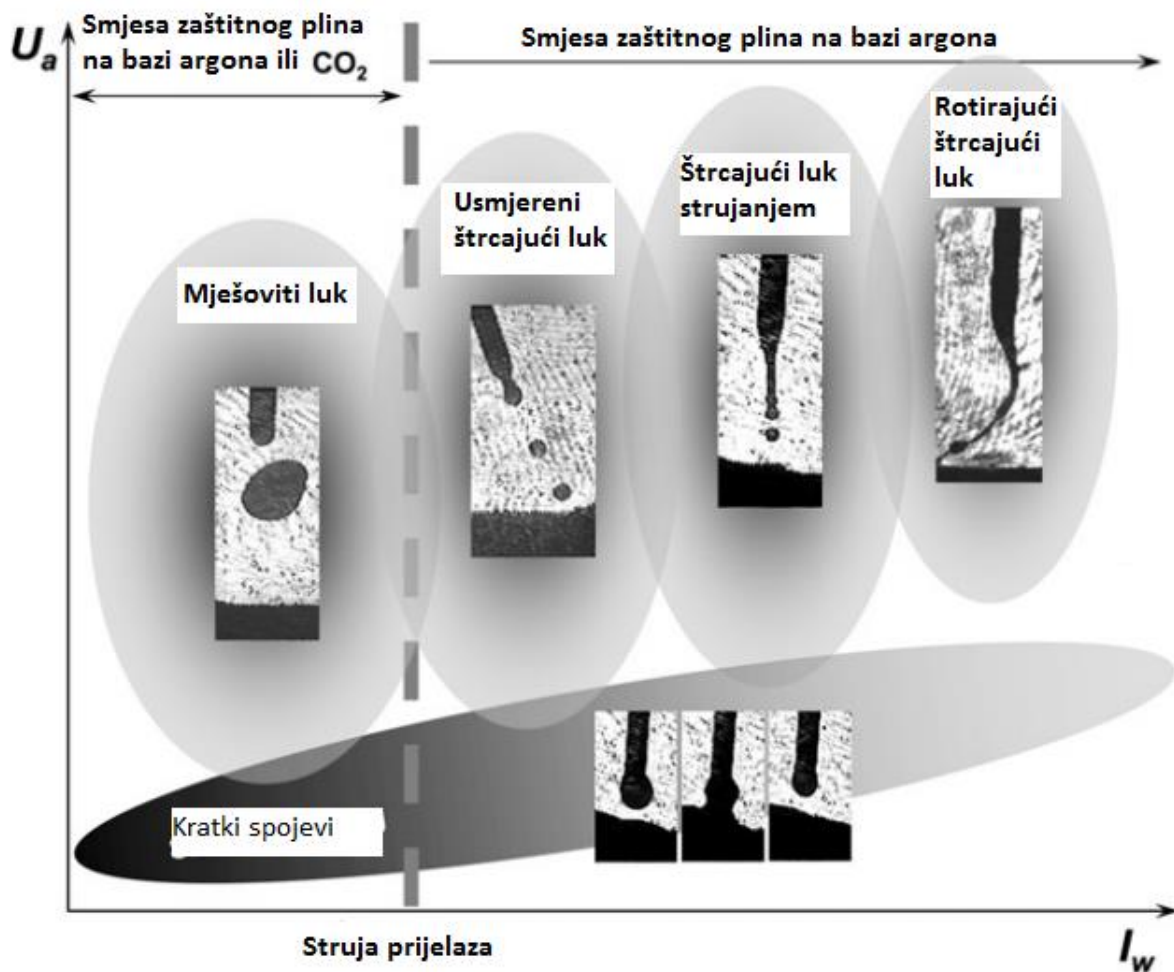
Tablica 4. Prirodni prijenos materijala kod elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom plina [8]

Grupa prijenosa	Način prijenosa	Izgled	Glavna sila upravljanja
Prijenos kontaktom	Kratki luk		Sile površinske napetosti i elektromagnetski pinch efekt
	Premošćivanje		Sile površinske napetosti
	Prisilni kratki luk		Iznimno jak elektromagnetski pinch efekt
	Mješoviti luk		Gravitacijska sila

Nastavak Tablice 4.

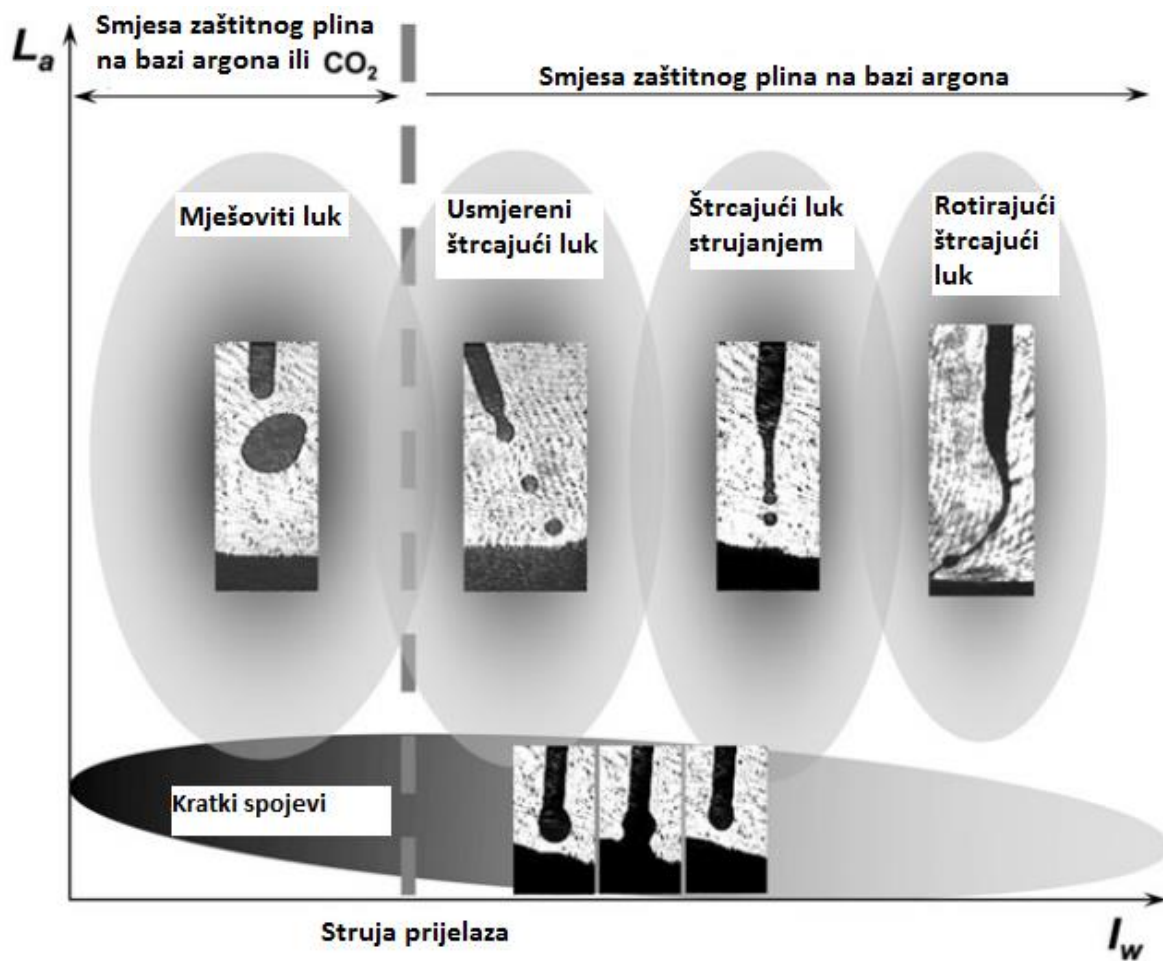
Grupa prijenosa	Način prijenosa	Izgled	Glavna sila upravljanja
Prijenos slobodnim letom	Mješoviti luk odbijanjem		Gravitacijska sila i odbojne sile
	Usmjereni štrcajući luk		Elektromagnetske sile
	Štrcajući luk strujanjem		Elektromagnetske sile

Svim tim načinim prijenosa zajedničko je da se odvijaju „prirodno“, odnosno da nisu pod utjecajem ostalih električnih parametara ili dobavom žice. Te grupe i njihovi dotični načini prijenosa metala povezani su sa parametrima procesa zavarivanja i zaštitnim plinom i mogu se prikazati grafički pomoću tzv. „mapa načina prijenosa metala“ (engl. Transfer Mode Maps). Najčešći prikaz je dijagram U_a (napon zavarivanja)- I_w (struja zavarivanja) kao što je prikazano na Slici 6.



Slika 6. Dijagram prikaza prijenosa materijala U_a - I_w [8]

Drugi način prikaza je dijagram L_a (duljina električnog luka)- I_w (slika 7.) jer se smatra da duljina električnog luka realnije opisuje utjecaj na prijenos metala u električnom luku [8].



Slika 7. Dijagram prikaza prijenosa metala L_a - I_w [8]

U dijagramima nisu prikazani načini prijenosa „Mješoviti luk odbijanjem“ i „Eksplozivni“ jer su prekriveni sa poljima mješovitog loka i usmjerenog štrcajućeg loka. Potrebno je naglasiti područja preklapanja koje karakteriziraju eventualne nestabilnosti tijekom prijenosa metala.

- Prijenos metala kratkim lukom – moguće je samo ako postoji kontakt (kratki spoj) između kapljice u formaciji i taline prije nego se kapljica odvoji. Prilikom perioda kratkih spojeva električni luk se gasi. Kao što je prikazano na slici 3., prijelaz rastaljenog metala se formira i raste kada u jednom trenutku se kapljica ne odvoji i bude povučena u talinu uslijed djelovanja sile površinske napetosti. U toj fazi struja kratkog spoja je zanemariva zbog čega elektromagnetska sila nije dovoljno snažna da suzi („pinch effect“) metalni prijelaz. Zatim, zbog smanjenog električnog otpora tijekom premošćivanja, struja naglo raste zagrijavajući žicu i dolazi do suženja i prekidanja prijelaza rastaljenog metala zbog kombiniranog djelovanja sile površinske napetosti i progresivne elektromagnetske sile, potonja je posljedica povećane struje u posljednoj fazi. Iako se proces smatra stabilnim jer je brzina žice jednaka brzini taljenja žice, trenutak nakon pojave kratkog spoja brzina dobave žice je veća od brzine taljenja što ima za posljedicu povećanje duljine električnog luka. U tom trenutku ubrzano je stvaranje nove kapljice na vrhu žice. Kako struja pada, brzina taljenja žice se izjednačuje sa brzinom dobave žice narednih nekoliko milisekundi. Nakon toga kada intenzitet struje postaje manji, brzina dobave žice je veća od brzine taljenja žice zbog čega dolazi do približavanja žice talini zavara. Potrebno je naglasiti da na kraju faze otvorenog luka, postoji kontinuirano ali sporo približavanje kapljice talini zavara (brzina taljenja je u tom trenutku spora kao i brzina stvaranja kapljice). Još jedan prisutan fenomen je oscilacija kapljice i taline zavara koja dovodi do oscilacije duljine električnog luka od 1 do 2 mm. Ako su te oscilacije kapljice i taline zavara usmjerene jedna prema drugoj, doći će do kratkih spojeva. Međutim, ako se međusobno ne poništavaju, tj. ako su znatno izvan faze, može doći do kontakta između žice i taline zavara i neće se moći odvijati proces prijenosa metala nego će doći do pojave rasprskavanja;

- Premošćivanje – način prijenosa samo kada je žica pod malim iznosom struje tijekom kontakta kapljice i taline zavara. Sila površinske napetosti postaje glavna sila upravljanja za prijenos metala, smanjujući ulogu elektromagnetskih sila za odvajanje kapljice od žice. Sa ovim načinom ne dolazi do pojave rasprskavanja zbog čega se talina zavara ponaša mirno što dovodi do jednoličnog izgleda zavara. Najčešće se generira kod izvora konstantne struje i/ili kod velikih iznosa induktiviteta zbog čega je izbor parametara vrlo uzak (napon električnog luka, struja zavarivanja i brzina zavarivanja). Prednost mu je kod zavarivanja tankih metalnih limova;
- Prisilni kratki luk – karakteriziraju ga parametri za zavarivanje kratkim spojem u kombinaciji sa visokom brzinom dobave žice, više od 10-12 m/min, i strujom zavarivanja do 250-350 A. Kako se prijenos metala odvija pod utjecajem elektromagnetske sile, kapljice su manjih veličina sa velikom brzinom prijenosa što u konačnici minimalizira površinsku napetost. Nedostatak je što dolazi do rasprskavanja;
- Mješoviti luk – pojavljuje se u procesu zavarivanja sa manjom do umjerenom jakosti struje i umjerenim do visokim naponom, čime se izbjegavaju kratki spojevi. Ovaj prijenos metala karakteriziraju velike kapljice (promjera 1.5-3 puta većeg od promjera žice) i spor prijenos kapljice sa žice, 1-10 kapljica u sekundi. Tijekom formiranja kapljica se zadržava na vrhu žice uslijed jake sile površinske napetosti i sile koje stvaraju pare, sve dok te sile ne svladaju gravitacijska i aerodinamička sila (kritičan promjer kapljice je dosegnut). Elektromagnetske sile su zanemarive zbog relativno male struje. Kada kapljica počne rasti, vrat koji se formira između kraja žice i kapljice je većeg presjeka nego područje spajanja luka sa metalom, što dovodi do povratnog pinch efekta. Kako kapljica raste, vrat se izdužuje i područje spajanja postaje veće od presjeka vrata i utom trenutku elektromagnetske sile pomažu odvajanju kapljice od vrha žice. Veličina kapljice, izgled i ponašanje ovise o vrsti zaštitnog plina, promjeru i sastavu žice dodatnog materijala i o iznosu struje zavarivanja;

- Mješoviti luk odbijanjem – nastaje iz mješovitog luka primjenom određenih uvjeta zavarivanja (neke vrste zašitnog plina, polaritet, itd.). Točke u luku postaju skupljene i koncentrirane ispod kapljice, stvarajući odbojne sile (povratni pinch efekt). Može doći i do prekomjernog stvaranja pare primjenom određenih zašitnih plinova (osobito smjesa bogatih CO₂). Velika kapljica se formira tik iznad taline stvarajući visok tlak koji djeluje na kapljicu. Rezultirajuća odbojna sila uzrokuje odmak kapljice od osi žice zbog čega kapljica započinje rasti samo s jedne strane. Do odvajanja kapljice sa žice dolazi u trenutku kada gravitacijska sila i aerodinamička sila nadjačaju odbojne sile električnog luka. Zbog same prirode mješovitog luka (običnog i odbojnog) ti prijenosi metala nisu pogodni za prisilne položaje zavarivanja. Npr. kod zavarivanja u vertikalnom položaju, neke kapljice se jednostavno izgube jer njihov volumen i masa sprečavaju prijenos sa žice u talinu zavara. Kao i kod kratkog luka, brzina dobave žice je približno jednaka brzini taljenja žice. Međutim, tijekom faze rasta kapljice, duljina električnog luka postaje sve kraća zbog čega dolazi do proporcionalnog porasta struje (korištenjem izvora struje sa karakteristikom konstantnog napona i većine zašitnih plinova). Brzina taljenja postaje veća od brzine dobave žice i kapljica raste u svim smjerovima, uključujući iznad žice. Kada počinje odvajanje kapljice, struja se postepeno smanjuje zbog čega brzina taljenja postaje manjom od brzine dobave žice. Također u toj fazi elektromagnetske sile pomažu gravitaciji da savlada silu površinske napetosti;
- Usmjereni štrcajući luk – karakteriziraju ga manje kapljice (približno promjeru žice) sa brzinom prijenosa sa žice na talinu zavara oko 100 kapljica u sekundi bez pojave kratkog spoja. Može se koristiti samo u horizontalnom položaju zavarivanja zbog velikog udjela rastaljenog metala u talini zavara. Preduvjet za prijenos metala ovim lukom je visoki napon i umjerena do jaka struja koja mora biti veća od struje prijelaza. Taj iznos je ovisan o nekoliko parametara poput dodatnog materijala, sastavu zašitnog plina, promjeru žice itd. Sa strujom manjom od prijelazne i sa umjerenim do visokim naponom, prijenos će biti mješovitim lukom. Strujom većom od prijelazne, kapljice postepeno postaju manje i dolazi do bržeg prijenosa kapljica. Vrh žice postaje šiljast zbog čega radijalna komponenta elektromagnetske sile postaje znatno veća izlažeći kapljicu jakom pinch efektu i ne može doći do formiranja veće kapljice. Oscilacije iznosa struje moraju biti stroge kao i jednakost brzine taljenja žice i dobave;

- Štrcajući luk strujanjem – daljnim povećanjem struje usmjereni štrcajući luk se pretvara u luk strujanjem. Površina anode se mora povećati jer dolazi jača struja na vrh elektrode jer se luk penje iznad vrha. Kao posljedica određeni volumen žice iznad spoja luka sa elektrodom se zagrijava dovoljno jako da taj dio prelazi u plastično područje zbog čega vrh elektrode poprima koničast izgled. Kraj žice izgleda kao da struji prema talini zavara. Na samom vrhu vrlo sitne kapljice se stvaraju i zatim odvajaju. Glavna sila upravljanja ovim prijenosom je elektromagnetska zbog čega su kapljice manje odnosno brži je prijenos kapljica sa žice u talinu zavara. Sve dok taj koničast kraj ne dodiruje talinu neće doći do rasprskavanja. Primjenjuje se uglavnom u horizontalnom položaju;
- Rotirajući štrcajući luk – Daljnim povećanjem struje dolazi se u područje rotirajućeg štrcajućeg luka. Jake elektromagnetske kao posljedica vrlo visoke struje, uzrokuju otklon žice od smjera toka omekšanog dijela elektrode. Kombinacija asimetričnih radijalnih sila i azimutskih sila uzrokuje spiralno kretanje tog dijela elektrode. Kapljice, vrlo malih dimenzija, se odvajaju od vrha rotirajućeg dijela elektrode u tangencijalnom smjeru uzrokujući znatno rasprskavanje;
- Eksplozivni prijenos – Prijenos kod kojeg se u određenim uvjetima (određeni zaštitni plin i sastav dodatnog materijala) kapljice odvajaju od žice eksplozivnom prirodom. Smatra se da je to posljedica kemijske reakcije unutar same kapljice (plin-metal). Dolaz do znatnog rasprskavanja [8].

3.2.2. Kontrolirani prijenosi metala

Posebne primjene u zavarivanju (npr. spajanje tankih limova metala, zavarivanje u vertikalnom položaju, itd.) naglašavaju mane „prirodnih“ prijenosa metala. Te mane se mogu ukloniti upotrebom naprednije opreme za zavarivanje koja dozvoljava automatsku prilagodbu i kontrolu prijenosa metala. Najčešći kontrolirani prijenos metala su impulsni prijenos i prijenos kontroliranim kontaktom.

Kod impulsnog prijenosa koristi se dulji električni luk, a struja zavarivanja se ciklički mijenja od malog iznosa (osnovna struja) ali dovoljno velikog za održavanje luka, do većeg iznosa (impulsna struja) dovoljno velikog za formiranje i odvajanje kapljice (prijenos sličan štrcajućim lukom).

Prijenos kontroliranim kontaktom se može smatrati kao potreba za poboljšanjem kratkog luka. Smanjujući nasumičnu komponentu prirodnih prijenosa, može se postići odvajanje kapljice bez rasprskavanja. Postoji više mogućnosti kako to postići, npr. kontrolom napona tijekom svake faze kontakta ili variranjem brzine dovoda žice radi uklanjanja tekućeg metalnog prijelaza.

Kontrolirani prijenos metala može se dalje podijeliti u kategorije u skladu sa najvažnijim parametrima koji se prilagođavaju:

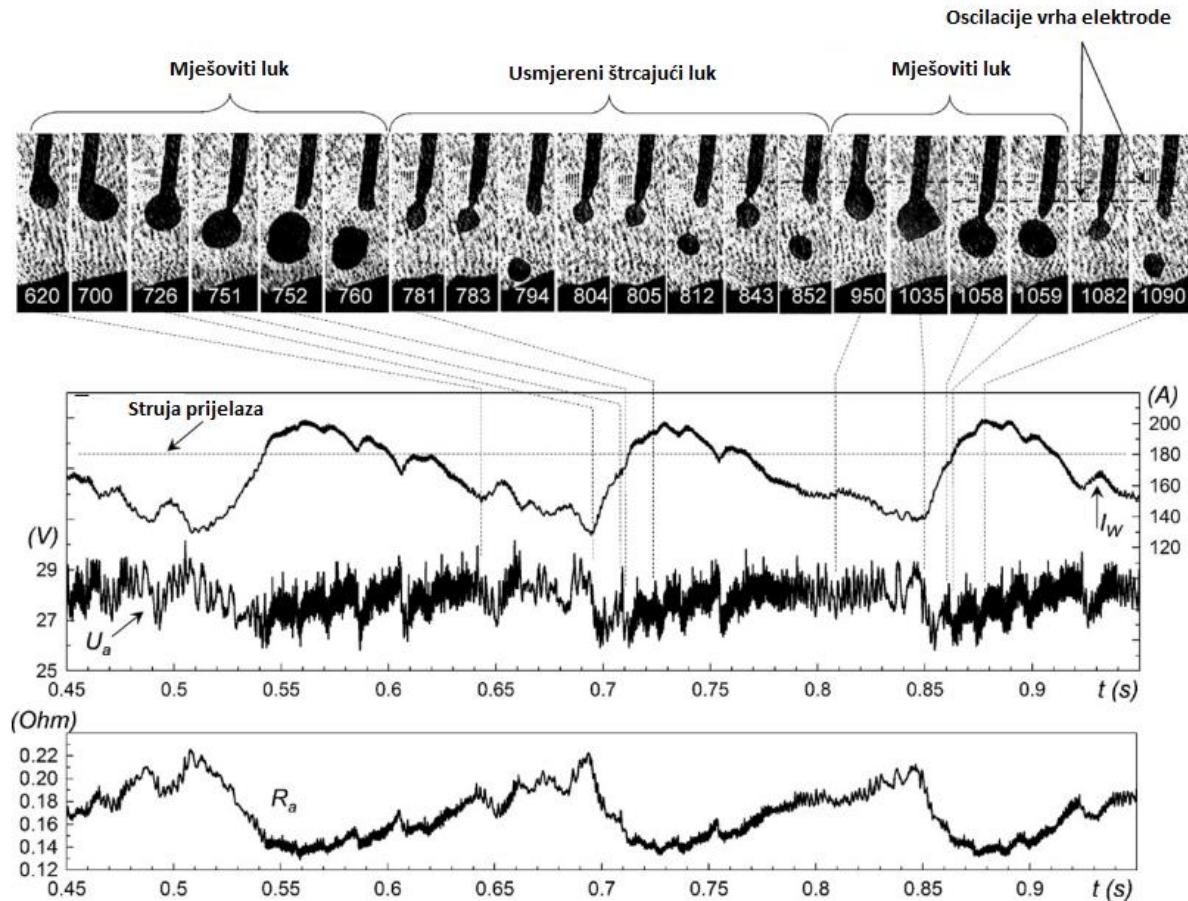
- Štrcajući luk kontroliran impulsnom strujom (istosmjerna i izmjenična) – jakost struje se automatski prilagođava pomoću uređaja koristeći algoritam za stvaranje adekvatnih trajanja impulsne i osnovne struje;
- Kontaktni prijenos kontroliran strujom – struja se kontrolira tijekom i prije faza kratkog spoja;
- Kontaktni prijenos kontroliran strujom i brzinom dobave žice – struja i brzina dobave žice se kontroliraju prije i tijekom faze kratkog spoja [8].

3.2.3. Prijenosi metala koji se odvijaju izmjenično

Često je pojava da se u procesu zavarivanja prijenosi metala odvijaju izmjenično što se uglavnom pripisuje trenutnim nestabilnostima pri prirodnom prijenosu metala koji su parametarski slični odnosno jedan do drugog (slika 5. i 6.). U određenim uvjetima moguća je izmjena načina 2 ili više prijenosa (jedan za drugim) periodički, bez upletanja operatera ili kontrolnog sustava. Važna karakteristika u ovom ponašanju je da sljedeći način prijenosa je posljedica prethodnog – varijacija struje, temperatura elektrode i/ili prisutnost plazme stvaraju uvjete za izmjenu sljedećeg načina prijenosa, npr:

- Kratki luk – usmjereni štrcajući luk;
- Kratki luk – štrcajući luk strujanjem;
- Mješoviti luk – usmjereni štrcajući luk;
- Mješoviti luk – kratki luk – štrcajući luk strujanjem – mješoviti luk, itd.

Ostali faktori koji utječu na odvijanje izmjeničnih prijenosa metala su: kombinacija struje, duljine luka, vrste i promjera dodatnog materijala, zaštitnog plina, udaljenost kontaktne cijevčice od radnog komada, induktivitet izvora struje itd [8]. Slika 8. prikazuje jedan takav način izmjeničnog prijenosa metala.



Slika 8. Izmjenični luk iz mješovitog u štrcajući [8]

3.3. Impulsno MIG zavarivanje

Impulsno MIG zavarivanje je tehnologija zavarivanja koji koristi impulse struja iz izvora struje za zavarivanje za kontrolirani (upravljani) prijenos kapljica metala sa vrha elektrode u električni luk s ciljem dobivanja stabilnog luka bez rasprskavanja. Koristi se prvenstveno za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika, ali moguće je upotreba za zavarivanje običnih ugljičnih čelika [9].

Impulsi imaju ulogu dovoda topline (energije) za taljenje dodatnog materijala i zatim odvajanja samo jedne kapljice po impulsu. Posljedica toga je konstantna veličina kapljica koje se odvajaju.

Prednosti impulsnog zavarivanja:

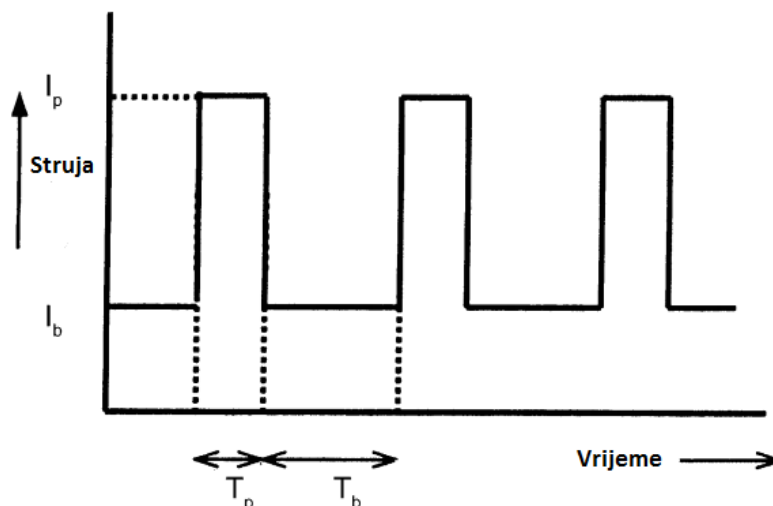
- Proces je u potpunosti kontroliran i bez rasprskavanja materijala;
- Mogućnost držanja struje na niskim vrijednostima je pogodno za zavarivanje nehrđajućih čelika i aluminija, za zavarivanje tanjih materijala ili zavarivanje u prisilnim položajima;
- Mogućnost dobivanja stabilnog luka pri korištenju debljih žica – pogodno za zavarivanje mekih metala zbog problema transporta žice;
- Efikasnije odvajanje kapljice smanjuje pregrijavanje te kapljice čime se smanjuje količina para.

Nedostaci impulsnog zavarivanja:

- Produktivnost je manja nego kod zavarivanja kratkim lukom. Većim unosom topline u odnosu na kratki luk smanjuje se brzina dobave žice;
- Uzak izbor zaštitnih plinova – udio CO_2 u smjesi Ar/CO_2 ne smije biti veći od 20% [10].

3.3.1. Parametri kod MIG impulsnog zavarivanja

Na slici 9. prikazan je idealan oblik vremenskog toka struje kod tranzistorskih izvora.

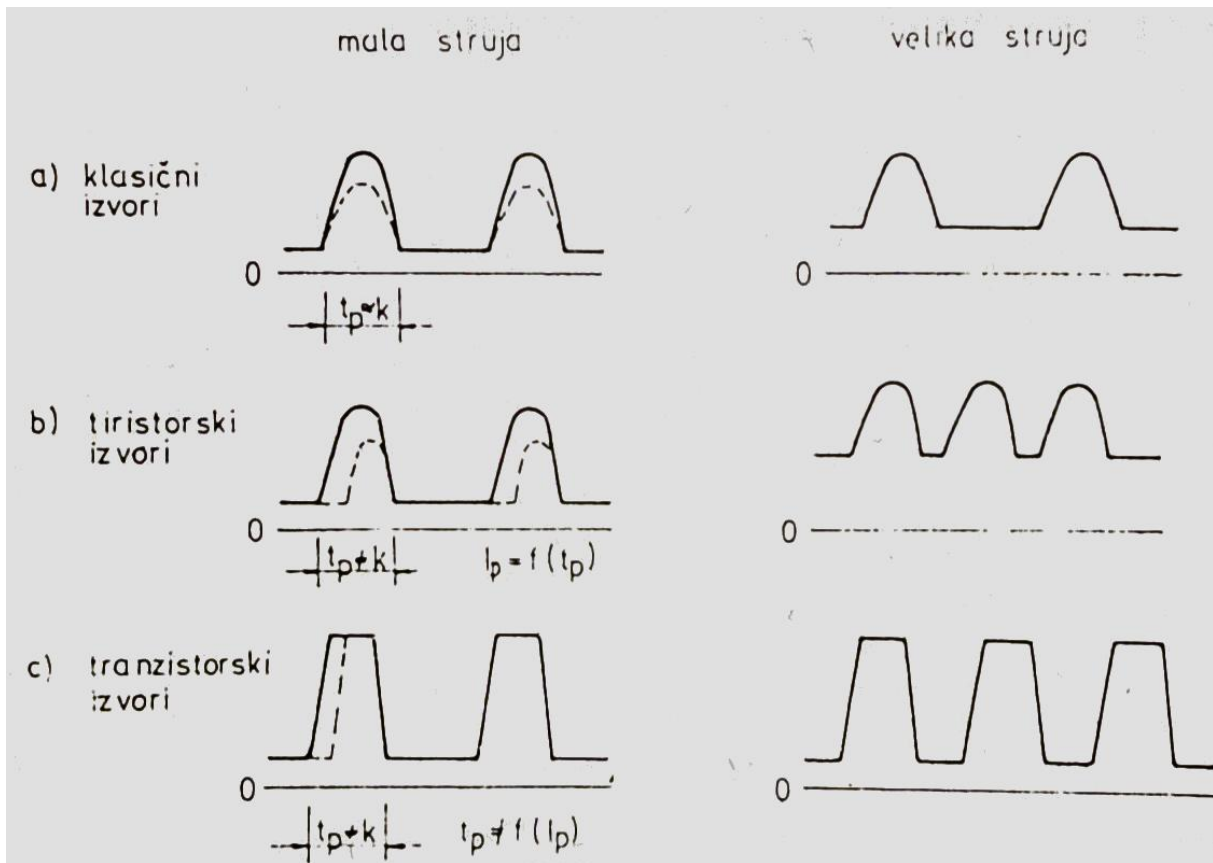


Slika 9. Idealan oblik vremenskog toka struje kod tranzistorskih izvora [1]

- Impulsna struja I_p - Iznos struje kod kojeg je moguće odvijanje prijenosa metala u štrcajućem luku. O impulsnoj struji ovisi veličina elektromagnetske sile na kapljicu te način otkidanja i brzina kretanja kapljice kroz električni luk;
- Osnovna struja I_b – Struja potrebna za održavanje luka, nije dovoljna da bi odvojila kapljicu rastaljenog metala. Mora omogućiti dobru ionizaciju prostora luka i predgrijavanje žice;
- Vrijeme trajanja impulsa T_p – Definirano je kao vrijeme od početka rasta struje do početka njezinog pada tijekom impulsa. Promjenom ovog vremena mijenja se energija impulsa pa prema tome i način prijenosa metala;
- Vrijeme trajanja osnovne struje T_b – Vrijeme na kojem je jakost struje na razini osnovne struje I_b ;
- Frekvencija impulsa – To je broj impulsnih struja u jednoj sekundi. Uzima se kao inverzna vrijednost zbroja vremena trajanja impulsa i osnovne struje. U praksi je najčešće od 25 Hz do 200 Hz. Kod nižih frekvencija prijenos metalal je u većim, a kod viših u manjim kapljicama;
- Veličina induktiviteta – Veličina koja određuje koliko brzo će struja rasti odnosno padati [6, 10, 11].

U praksi su mogući različiti oblici impulsa (Slika 10.):

- Sinusoidni oblik impulsa;
- Pravokutni oblik impulsa;
- Trapezni, trokutasti oblici i dr.



Slika 10. Oblici impulsa [6]

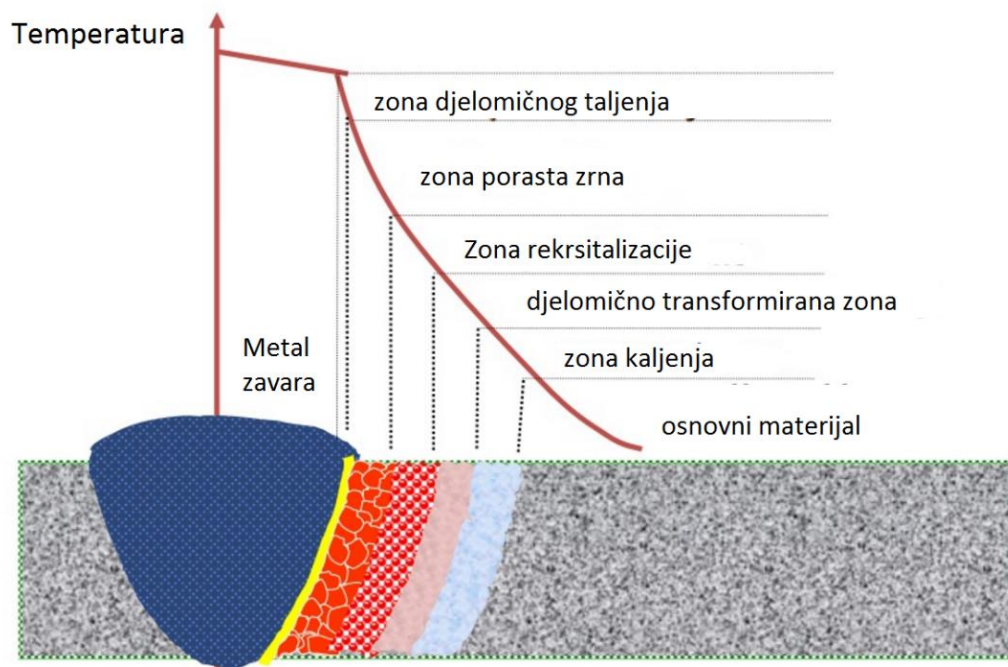
Da bi se dobila potrebna energija impulsna struja mora biti dovoljno velika (uz odgovarajući napon) da se za vrijeme svakog impulsa kapljica metala uspije rastaliti, odvojiti i prenijeti. U usporedbi sa impulsima pravokutnog oblika, kod sinusoidnog oblika struja impulsa mora biti nešto veća jer se dobiva manje enegije [6].

4. ZAVARLJIVOST ALUMINIJSKIH MATERIJALA

Aluminijski materijali se općenito mogu spajati svim postupcima zavarivanja taljenjem. Sama zavarljivost ovisi o odabranom postupku, o sadržaju legirajućih elemenata i stanju legure. Može biti smanjena zbog veličine utjecaja na čvrstoću ili zbog povećane sklonosti pukotinama u zavarenom spoju [13].

4.1. Utjecaj topline na zavarivanje

Unosom topline prilikom zavarivanja zagrijava se sam zavareni spoj i područje na osnovnom materijalu u neposrednoj blizini spoja. Širina zone utjecaja topline ovisi o količini unesene topline što pak ovisi o samom postupku zavarivanja, tehnologiji, osnovnom materijalu i geometriji spoja [3, 15]. Na slici 11. prikazane su zone unutar zavara.

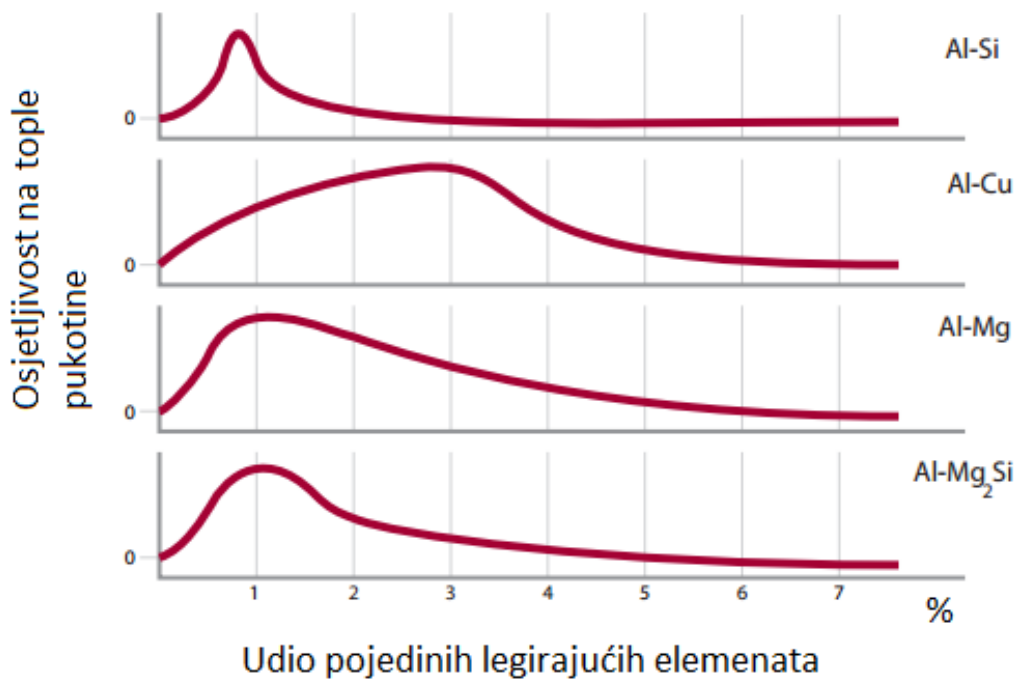


Slika 11. Zone unutar zavara [14]

4.2. Tople pukotine

Osim zone taljenja potrebno je promatrati i zonu utjecaja topline jer ti dijelovi zavarenog spoja mogu biti mjesto nastanka toplih pukotina. Osnovni uzrok nastanka pukotina je postojanje područja toplinske krhkosti. Pojava toplih pukotina ovisi o kemijskom sastavu osnovnog materijala i dodatnog, načinu kristalizacije, segregiranju reakcijskih naprezanja, režimu zavarivanja, stupnju miješanja osnovnog i dodatnog materijala [3, 15].

Krivilje osjetljivost na tople pukotine su koristan način za shvaćanje zašto dolazi do toplih pukotina u zavaru i kako odabir dodatnog materijala može utjecati na osjetljivost. Na slici 12. prikazan je dijagram četiri vrste aluminijskih legura kako utječu na osjetljivost kao legirni elementi u aluminiju: Silicij (Si), Bakar (Cu), Magnezij (Mg) i Magneziji silicid (Mg_2Si).



Slika 12. Utjecaj legirajućih elemenata na osjetljivost na tople pukotine [16]

Iz dijagrama se može vidjeti da sa dodatkom manih udjela legirajućih elemenata osjetljivost na tople pukotine naglo raste, još većim legiranjem doseže maksimum nakon čega svaki veći udio legirajućih elemenata smanjuje osjetljivost na tople pukotine.

Postoje dva načina za sprječavanje nastanka toplih pukotina u aluminijskim materijala:

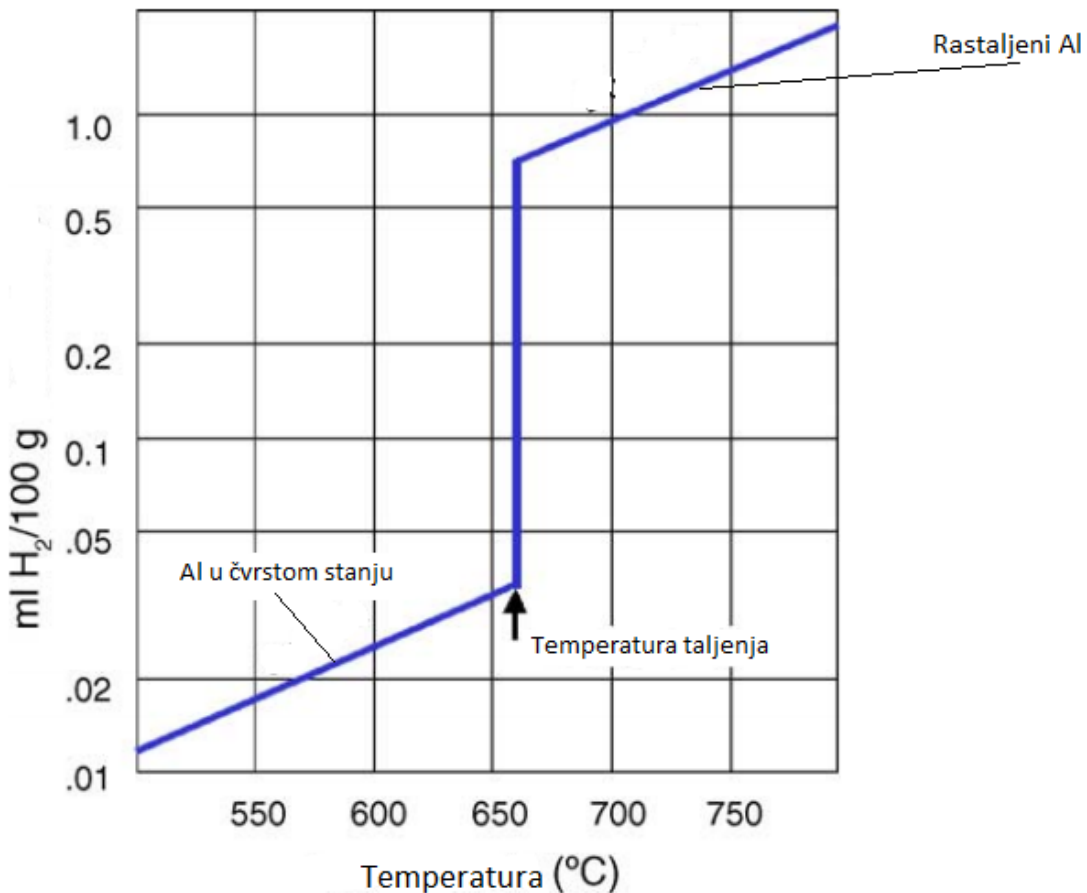
- Zavarivanje Al legure koja već ima nisku osjetljivost na tople pukotine – koristiti dodatan materijal sličnog kemijskog sastava kao i osnovni;
- Zavarivanje Al legure koja ima visoku osjetljivost na tople pukotine – koristiti dodatan materijal različitog kemijskog sastava [16].

4.3. Poroznost

Jedan od najvećih problema pri zavarivanju aluminijskih materijala je poroznost uzrokovana vodikom pri skrućivanju taline zavara. Poroznost uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće i zamor materijala. Najveći uzrok poroznosti u aluminijskim legurama je zarobljen vodik što je posljedica velike razlike u topljivosti vodika u rastaljenom i krutom aluminiju. Vodik u zavar dolazi iz zaštitnih plinova, nečistoća, zraka ili vlage. Na slici 13. je prikazana je topljivost vodika na različitim temperaturama aluminija iz koje se može vidjeti da je topljivost vodika veća u rastaljenom aluminiju nego u krutom.

Poroznost će se javiti kada otopljeni vodik ne može izaći iz taline zavara tijekom faze skrućivanja. Ako je hlađenje prebrzo, plin vodika ne može izaći iz taline na vrijeme i doći će do poroznosti u zavaru. Poroznost također ovisi i o sastavu materijala [17].

Da bi se dobio zavar bez poroznosti potrebno je omogućiti vodikom da u velikoj mjeri (90-95 %) izađe iz taline zavara, odnosno potrebno je otplinjavanje. To se postiže predgrijavanjem i manjom brzinom zavarivanja što nije povoljno jer se na taj način dobije grublja skrućena zavara i šira zona utjecaja topline, odnosno manja čvrstoća zavarenog spoja. Drugi način je da uz optimalne brzine zavarivanja je potrebno temeljno očistiti površine mjesta zavarivanja, površine dodatnog materijala moraju biti čiste i suhe, zatim primjena žice većeg promjera, velika čistoća zaštitnog plina i koristiti postupke poput impulsnog MIG zavarivanja jer svojom promjenom jakosti struje zavarivanja dobro utječe na otplinjavanje [18].



Slika 13. Topljivost vodika na različitim temperaturama u aluminiju [17]

4.4. Utjecaj toplinske vodljivosti

Toplinska vodljivost aluminijских materijala je veća oko 3 puta nego kod čelika. Ovisi o pojedinoj legure tako npr. kod tehničkog aluminija 2,26-2,29 W/cmK pri 20 °C, dok je kod Al-Mg 1,20-1,34 W/cmK. Visoka toplinska vodljivost aluminija utječe na brzo odvođenje topline s mjesta zavarivanja što smanjuje brzinu zavarivanja i dubinu protaljivanja, ubrzava skrućivanje zavara, smanjuje mogućnost otplinjavanja i povećava mogućnost nastanka poroznosti i naljepljivanja. Dobra toplinska vodljivost aluminijских materijala proširuje zonu utjecaja topline i smanjuje čvrstoću zavarenog spoja u ZUT-u.

Da se uklone ti nedostaci potrebno je predgrijavanje ili povećanje unosa energije, odnosno učinka električnog luka. Učinak luka se može povećati jakošću struje zavarivanja ili mješavinom plinova Ar+He. Korištenjem te mješavinu umjesto čistog helija dobiva se ujedno i veća kvaliteta zavara [18].

4.5. Utjecaj Al oksida

Površina svakog aluminijskog materijala prekrivena je slojem aluminijskog oksida (Al_2O_3) debljine 1-3 nm. Povećanjem temperature povećava se debljina sloja oksida do 10 puta. Temperatura taljenja Al_2O_3 je $2050\text{ }^\circ\text{C}$ što je znatno veće od temperature taljenja aluminijskih materijala koja iznosi $600\text{-}660\text{ }^\circ\text{C}$. Osim toga i gustoća Al_2O_3 je veća od aluminijeve, 4 g/cm^3 u odnosu na $2,7\text{ g/cm}^3$.

Aluminijev oksid otežava zavarivanje aluminijskih materijala, teško je rastaljiv i teži je od aluminija što može dovesti do uključaka u zavaru. Također je higroskopian pa može stvarati poroznost u zavaru. Utječe i na otpor u strujnom krugu jer nije električki vodljiv. Zbog toga je potrebno uklanjanje oksidnog sloja: mehaničkim putem, struganjem, četkanjem, kemijskim sredstvima itd.

Kod MIG zavarivanja oksidni sloj se može ukloniti sa osnovnog materijala, spajanjem elektrode na „+“ pol. Tada teški ioni udaraju na površinu radnog komada i na taj način „drobe“ oksidni sloj na mjestu zavarivanja [18].

5. MIG ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH MATERIJALA

Većina zavarivanja aluminijskih materijala se odvija MIG postupkom. Svojstva zavara moraju biti barem jednaka ili veća od osnovnog materijala uz brzine zavarivanja veće od drugih elektrolučnih postupaka. Zone utjecaja topline su uže nego kod plinskog zavarivanja. Elektroda se spaja na „+“ pol izvora istosmjerne struje, a električni luk je zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Dodatni materijal, odnosno žica, je na bazi aluminijske žice koja se kontinuirano dodaje u osnovni materijal iz namota [15].

MIG postupak zavarivanja općenito predstavlja danas osnovnu tehnologiju zavarivanja aluminijskih materijala svih vrsta i debljina uz zadovoljavajuću kvalitetu, posebno pri uporabi impulsnog MIG zavarivanja. Prilagodljiv je za ručno, mehanizirano, automatizirano i robotizirano zavarivanje. U praksi se najčešće primjenjuje ručno vođeni poluautomatizirani MIG postupak [19].

5.1. Izbor osnovnih parametara zavarivanja

U slučaju MIG zavarivanja impulsnom strujom, osnovna struja mora biti tako odabrana da nakon prestanka impulsa ne dođe do prekidanja električnog luka, a najčešće je to u području vrijednosti od 40 do 50 A. Duljina impulsa mora biti tako odabrana da se omogući odvajanje jedne kapljice prije nastanka kratkog spoja (1-3 ms), u suprotnom se može dogoditi nastajanje više kapljica u jednom impulsu. Frekvencija proizlazi iz namještenja ostalih parametara. Kod zavarivanja aluminijskih materijala najčešće se koristi impulsna frekvencija od 100 Hz [20].

5.2. Duljina slobodnog kraja žice

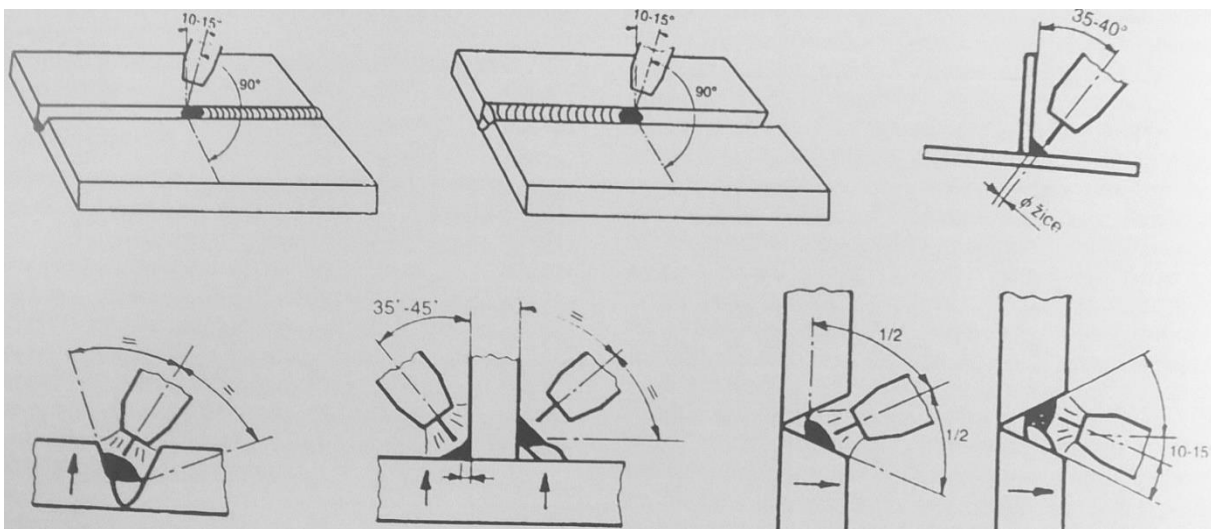
Duljina slobodnog kraja žice ovisi o promjeru žice, odnosno jakosti struje zavarivanja kojom je opterećen slobodni kraj žice. U pravilu iznosi:

- Kod malih jakosti struje zavarivanja (kratki luk): 10 puta promjer žice;
- Kod srednjih jakosti struje zavarivanja (mješoviti luk): 12 puta promjer žice;
- Kod većih jakosti struje zavarivanja (štrcajući luk): 15 puta promjer žice.

Kod MIG zavarivanja aluminijskih materijala slobodni kraj žice mora biti malo duži čime se smanjuje dovođenje vodika u talinu zavora. To uzrokuje povećani otpor prolazu struje, a time i povećano zagrijavanje žice. Zbog toga dolazi do povećanog isparavanja vlage apsorbirane u oksidnom sloju na površini žice [20].

5.3. Tehnike rada

Postoje dva načina zavarivanja: desnom tehnikom i lijevom tehnikom. Kod zavarivanja debljih materijala povoljnije je zavarivanje desnom tehnikom čime se postiže bolje čišćenje oksida, veće protaljšivanje i bolja zaštita procesa zavarivanja. Kod zavarivanja tankih materijala povoljnije je zavarivanje lijevom tehnikom jer je manje protaljšivanje i ljepši je površinski izgled zavora. Slika 14. prikazuje nekoliko primjera nagiba pištolja kod MIG poluautomatskog zavarivanja.



Slika 14. Primjeri nagiba pištolja kod MIG poluautomatskog zavarivanja [20]

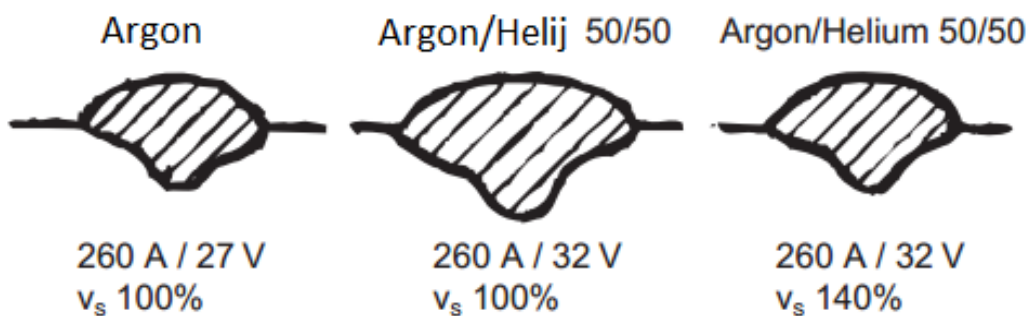
Radi boljeg pregleda kod ručnog MIG zavarivanja pištolj se drži pod kutem od $10-15^\circ$ neutralne, okomite osi. Pomoću nagiba pištolja električni luk se usmjerava tako da dobro zagrijava i tali osnovni materijal, da je pravilno usmjeren mlaz kapljica rastaljenog metala dodatnog materijala te da se silama pravilno pridržava talina. Prevelik nagib pištolja pri zavarivanju znatno smanjuje zaštitu procesa i uzrokuje poroznost u zavoru. Nepovoljnim strujanjem zaštitnog plina može doći do uvlačenja okolnog zraka u zaštitni omotač [20].

5.4. Izbor vrste i količine zaštitnog plina

Kao zaštitni plin za MIG zavarivanje aluminijskih materijala najčešće se koristi argon čistoće 99,96 %. Izbor količine zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, položaju zavarivanja i utjecaju okoliša. Kod malih jakosti struje (100-150 A) približno iznosi 14 l/min, a 18 l/min kod srednjih jakosti pa sve do 28 l/min za vrlo velike jakosti struje zavarivanja, Kod prisilnih položaja protok zaštitnog plina se povećava, naročito kod nadglavnog položaja. Treba izbjegavati preveliki protok plina jer nastaje povećano vrtloženje plina koji istječe, a to može uzrokovati usisavanje okolnog zraka u zaštitni omotač [20].

Korištenjem argona moguća je uspostava električnog luka bez rasprskavanja. Niska toplinska vodljivost argona uzrokuje širi šav u gornjem dijelu zavara, dok donji dio zavara ostaje uzak.

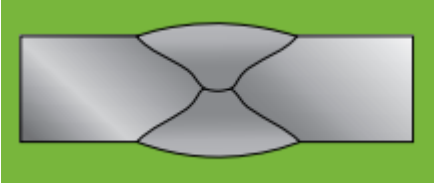
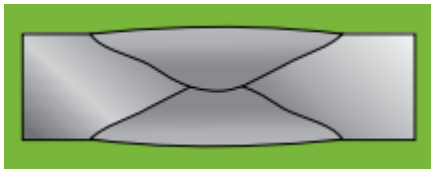
Helij kao zaštitni plin nema tu manu i daje širi zavar sa većom penetracijom. Čisti helij se rijetko koristi kao zaštitni plin pri MIG zavarivanju već se koriste smjesa Ar-He sa udjelom helija od 30 do 70%. Kada nema potrebe za većom penetracijom kao kod zavarivanja tanjih materijala, svojstva helija (veći toplinski kapacitet i niža toplinska provodljivost u odnosu na argon) omogućuju veću brzinu zavarivanja. Na slici 21. prikazani su izgledi zavara za Ar kao zaštitni plin i smjesu Ar/He u omjeru 50:50 s različitim brzinama zavarivanja.



Slika 15. Izgled zavara pri korištenju različitih plinova [21]

Smjesa Ar/He zahtjeva različite parametre nego kod čistog Ar. Dodatkom He u smjesu, smanjuje se električna provodljivost luka - za istu brzinu dovoda žice električni luk je kraći što je veći udio He, ako se ne prilagodi napon luka. Za smjesu od 50% He / 50% Ar napon se mora povećati za 4-5 V. Zbog niže gustoće He također mora biti veći protok plina [21]. U tablici 5. prikazani su utjecaji Ar i He na svojstva zavora.

Tablica 5. Utjecaj Ar i He na svojstva zavora [16]

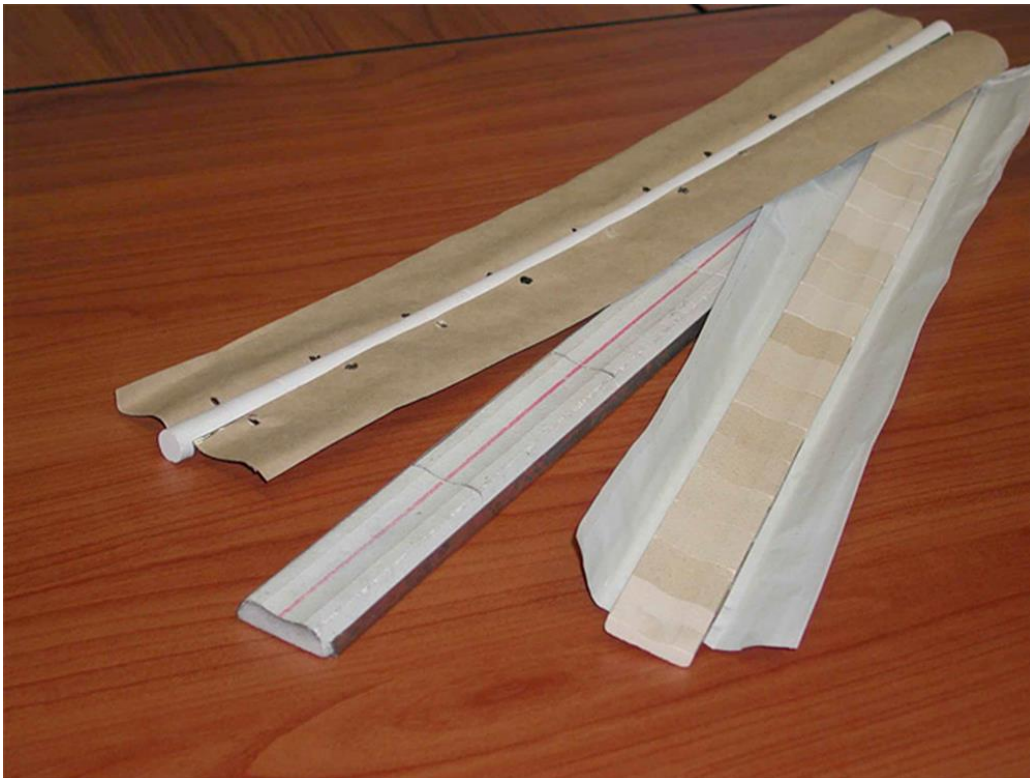
	 Argon	 Helij
Penetracija	niža / uži zavar	viša / širi zavar
Mehnaička svojstva	slabo utječe	više utječe
Brzina zavarivanja	sporija	veća
Izgled zavora	naboran	gladak
Efekt čišćenja	dobar	loš
Izgled zavora (boja i čađa)	svjetlija / čišća	više čađe
Stabilnost luka	stabilan	manje stabilan
Poroznost	viša	niža

6. PODLOGE ZA ZAVARIVANJE

Podloge za zavarivanje su elementi koji pomažu u samom procesu zavarivanja. Najčešća primjena je kada se traži potpuni provar, a pristup je moguć samo sa jedne strane radnog komada. U tom slučaju podloga služi kao osnova za zavarivanje korijena čime se sprječava curenje metalne kupke.

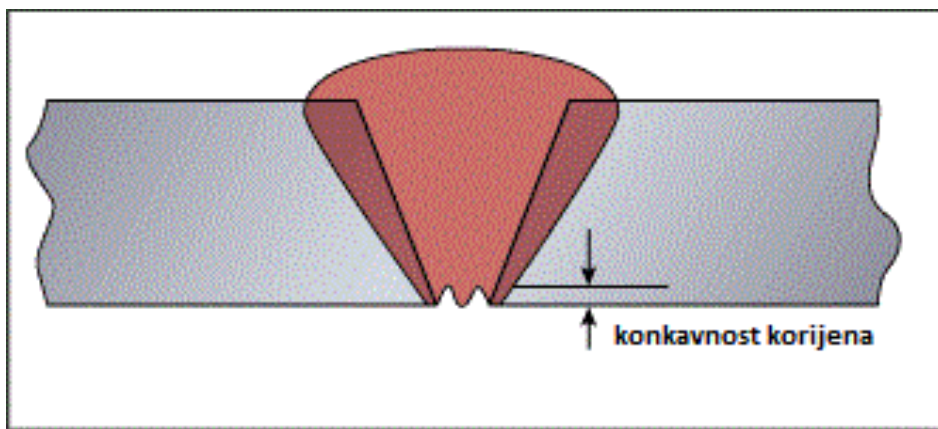
Podloge za zavarivanje se dijele na:

- Trajne podloge – najčešće su od sličnog materijala kao i radni komad i kao što im samo ime kaže, postaju dio samog zavarenog spoja jer se spoje sa korijenom zavara;
- Privremene podloge (Slika 16) – izrađuju se od bakra ili keramike i ne spajaju se korijenom zavara tijekom zavarivanja

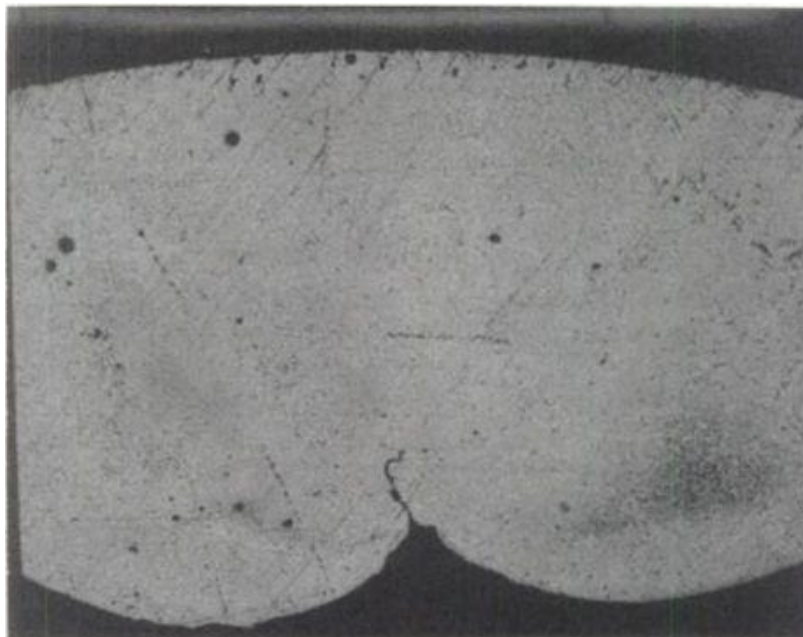


Slika 16. Privremene podloge za zavarivanje [27]

Jedan od problema zavarivanja aluminija je njegovo brzo stvaranje oksidnog sloja. Često se događa da nakon zavarivanja korijena, zavar postane konkavan kako je prikazano na slikama 17. i 18. (ovisno o parametrima zavarivanja) uslijed skrućivanja taline zavara. Oksidi aluminija koji nastaju imaju tendenciju pomicati središte zavarenog spoja i u trenutku kada ta pomicanja postanu velika, središte zavarenog spoja se uvuče i poprimi oblik žlijeba. Osjetljivost je veća kod zavarivanja sučeljnih spojeva sa velikom širinom korijena zavara i visokim jakostima struje zavarivanja. Upotrebom privremenih podloga za zavarivanje dobije se veća kontrola nad talinom zavara i sprječava se kontakt između okolne atmosfere i taline zavara, odnosno nastajanje oksida [29].



Slika 17. Konkavnost korijena zavara [30]


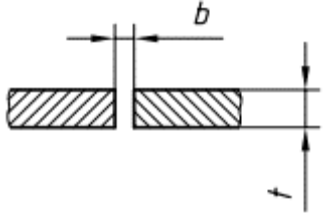


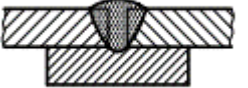
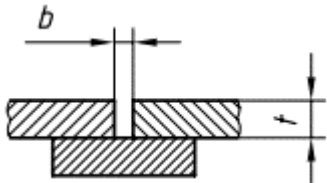
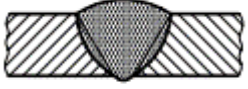
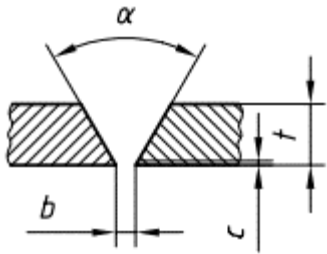


Slika 18. Pukotine i ukljucci oksida uzrokovani konkavnošću korijena [29]


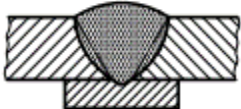
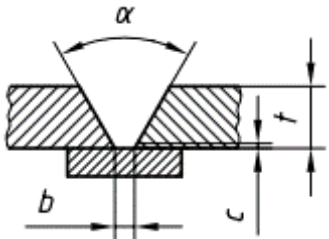

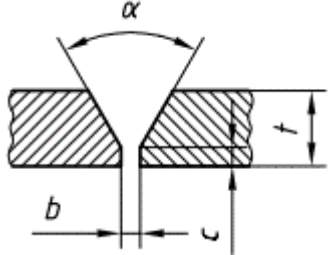

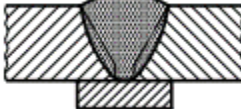
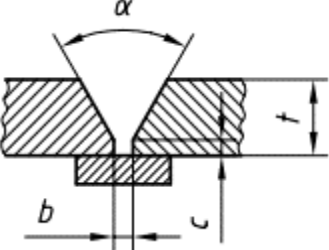
7. HRN EN ISO 9692-3

Hrvatska norma HRN EN ISO 9692-3 je norma koja definira parametre za vrste pripreme spojeva za elektrolučno zavarivanje inertnim plinom, MIG (131) i za zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, TIG (141) aluminijske i njegovih legura. Primjenjuje se za zavare s potpunim provarom [22]. U tablici 6. dana je usporedba pripreme spojeva sa i bez podloške. Odabir detalja spoja (kut, razmak, visina grla) ovisi o debljini spoja, poziciji i procesu zavarivanja. Odabirom većih razmaka ($\geq 1,5$ mm) dozvoljeni su manji kutevi i preporučena je upotreba podloga za zavarivanje. Za jednostrano zavarivanje podloge moraju biti ožljebljeni.

Tablica 6. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [22]

Debljina osnovnog materijala t	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut α, β	Razmak b	Visina grla c
$t \leq 4$				-	$b \leq 2$	-
$2 \leq t \leq 4$	 			-	$b \leq 1,5$	-
$3 \leq t \leq 5$	∇			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$
				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 2$	

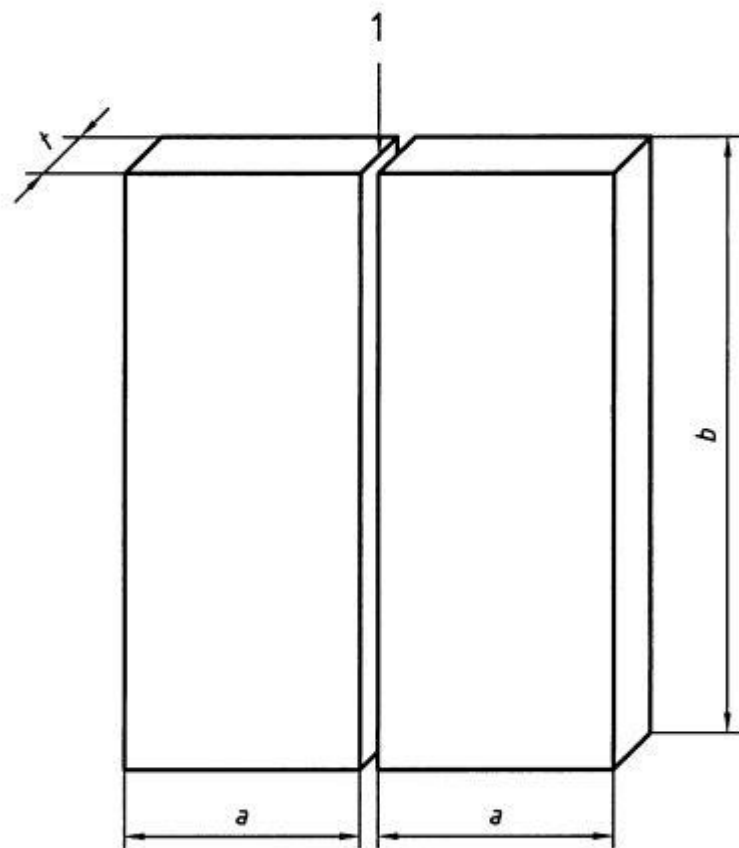
Nastavak Tablice 6.

Debljina osnovnog materijala t	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut α, β	Razmak b	Visina grla c
$3 \leq t \leq 5$				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$
$3 \leq t \leq 15$	Y			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$
$6 \leq t \leq 25$				$\alpha \geq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 10$	$c = 3$

8. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno zavariti uzorke od aluminijske legure sa i bez primjene keramičke podloge uz primjenu MIG impulsnog načina zavarivanja. Definirane su tehnologije za oba slučaja i provedena ispitivanja.

Prema normi HRN EN ISO 15614-2 definirane su dimenzije uzoraka za sučeljni spoj (Slika 19):



Slika 19. Uzorak za zavarivanje sučelnog spoja sa potpunom penetracijom [31]

- 1 - Priprema spoja
- a - Minimalno 150 mm
- b - Minimalno 300 mm
- t - Debljina osnovnog materijala

Raspoloživi uzorci za zavarivanje nisu ispunjavali minimalne dimenzije ($a / b = 105 / 275$) zbog čega nije bilo moguće dobiti dovoljan broj ispitnih uzoraka koje norma HRN EN ISO 15614-2 definira.

Za svaki sučeljeni spoj uzet je po jedan uzorak za statičko vlačno ispitivanje, jedan uzorak za lice zavara i jedan uzorak za korijen zavara za ispitivanje savijanjem, dok norma definira po dva uzorka za navedena ispitivanja.

8.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada



Slika 20. Stanica za zavarivanje u Laboratoriju za zavarivanje FSB

8.1.1. Izvor struje

Kao izvor struje za zavarivanje korišten je Welbee P400 prikazan na slici 21. Osnovne tehničke specifikacije dane su u tablici 7.

Tablica 7. Tehničke specifikacije Welbee P400 [23]

Nazivni ulazni napon (V)	400 +/- 15 %
Broj faza	3
Nazivna ulazna snaga (kVA)	19,2
Nazivni radni ciklus (%)	50
Nazivna struja za zavarivanje (A)	400
Nazivni napon opterećenja (V)	34
Raspon struje za zavarivanje (A)	30 - 400
Raspon napona za zavarivanje (V)	12 – 34
Maksimalni napon praznog hoda (V)	80
Masa (kg)	62
Dimenzije V/D/Š (mm)	592 / 710 / 395
Statička karakteristika	CV



Slika 21. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400 u Laboratoriju za zavarivanje FSB

8.1.2. Specifikacija osnovnog materijala AW 5083

U tablici 8. prikazana su mehanička svojstva osnovnog materijala, a u tablici 9. kemijski sastav.

Tablica 8. Mehanička svojstva osnovnog materijala [24]

Gustoća, [kg/m³]	Modul elastičnosti, [kJ/mm²]	Tvrdoća, [HB]	Vlačna čvrstoća, [N/mm²]	Granica elastičnosti, [N/mm²]	Toplinska provodnost, [W/mK]
2660	70,3	81	300	190	117

Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala [24]

Kemijski element	Maseni udio, [%]
Al	92,40 – 95,60
Mg	4,00 – 4,90
Mn	0,40 – 1,00
Cr	0,05 – 0,25
Cu	< 0,10
Fe	< 0,40

8.1.3. Specifikacija dodatnog materijala

Kao dodatan materijal korištena je žica tvorničkog naziva AUTROD 5183 tvrtke ESAB. Žica je promjera 1,2 mm od materijala AW 5083. Mehanička svojstva žice su prikazana u tablici 10., a kemijski sastav u tablici 11.

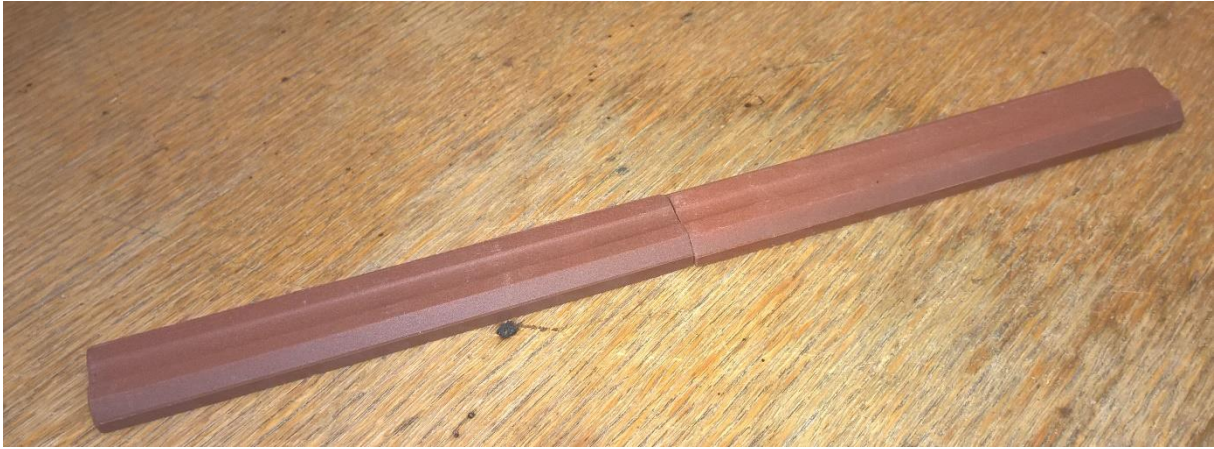
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala [24, 25]

Granica elastičnosti [N/mm²]	Vlačna čvrstoća [N/mm²]	Istezanje [%]	Gustoća [kg/m³]
≥ 125	≥ 275	5	2660

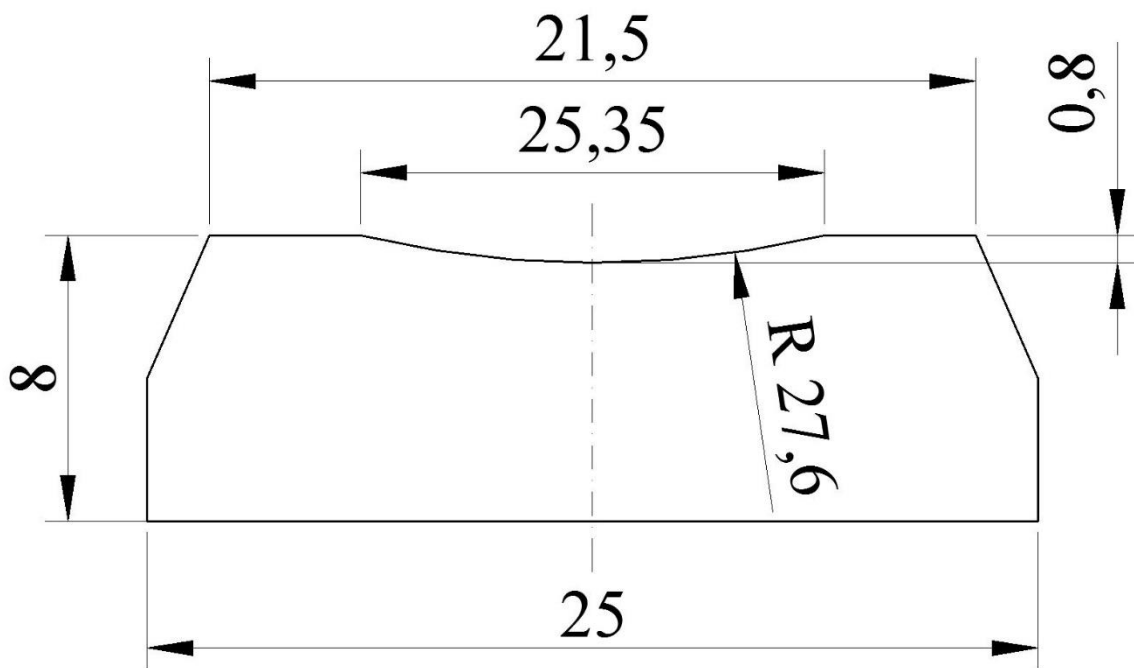
Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala [26]

Kemijski element	Maseni udio, [%]
Al	94,20
Mg	4,9
Mn	0,65
Cr	0,08
Cu	0,01
Fe	0,13
Ti	0,10
Si	0,04
Zn	0,01

8.1.4. Podloga za zavarivanje



Slika 22. Keramička podloga

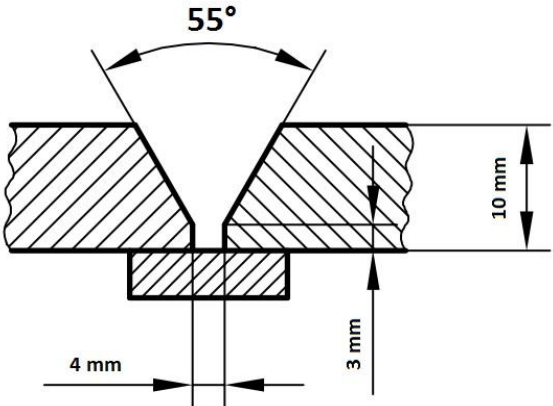
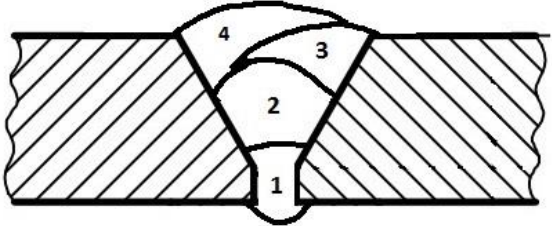


Slika 23. Skica presjeka keramičke podloge

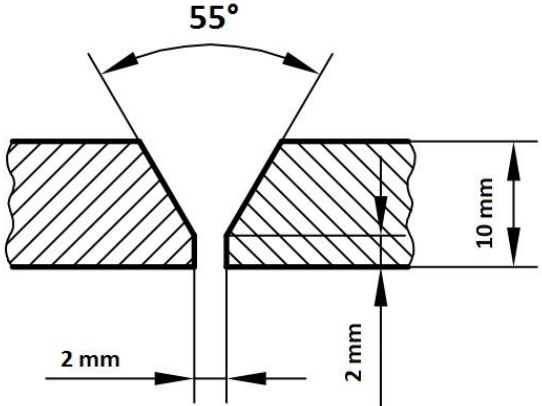
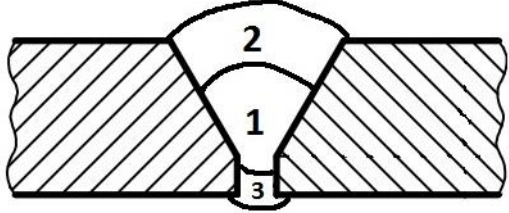
8.2. Zavaarivanje uzoraka

U tablicama 12. i 13. dane su specifikacije postupaka zavarivanja.

Tablica 12. Specifikacija postupka zavarivanja uzorka A

Mjesto: Zagreb Oznaka uputstva za zavarivanje(WPS) : 06/2016 Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR): Poduzeće: Ime zavarivača: Postupak zavarivanja: 131 Vrsta zavara i spoja: sučeljni spoj Pojednostosti pripreme žlijebe: V – priprema, keramička podloška				Ispitno mjesto: FSB, Zagreb Način pripreme rubova i čišćenja: Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083 HRN EN ISO 18273:2016 Debljina osnovnog materijala: 10 mm Položaj zavarivanja: PA Tehnika zavarivanja: Desna				
Oblikovanje zavarenog spoja				Redosljed zavarivanja				
								
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1, 2	131	1,2	140	21	DC+ (impulsno f=60Hz)	9	290	0,486
3, 4	131	1,2	180	23	DC+ (impulsno f=60Hz)	11,5	290	0,685
Dodatni materijal: ESAB Autorod 5183 Zaštitni plin/prašak: -zaštitni plin: 100% Argon Protok plina: -zaštitnog plina: 16 l/min Temperatura predgrijavanja: 120° Međuslojna temperatura: 100°				Dodatne informacije: 1. Pripremiti rubove lima tako da kut između bude 55° 2. Limove postaviti s razmakom od 4 mm između njih. 3. Zalijepiti keramičku podlogu folijom tako da mjesto zavara bude iznad keramičke podloge				

Tablica 13. Specifikacija postupka zavarivanja uzorka B

Mjesto: Zagreb Oznaka uputstva za zavarivanje(WPS) : 06/2016 Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR): Poduzeće: Ime zavarivača: Postupak zavarivanja: 131 Vrsta zavara i spoja: sučeljni spoj Pojednosti pripreme žlijeba: V - priprema				Ispitno mjesto: FSB, Zagreb Način pripreme rubova i čišćenja: Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083 HRN EN 18273:2016 Debljina osnovnog materijala: 10 mm Položaj zavarivanja: PA Tehnika zavarivanja: Lijeva				
Oblikovanje zavarenog spoja				Redosljed zavarivanja				
								
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja. [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1, 3	131	1,2	140	21	DC+ (impulsno f=60Hz)	9	290	0,486
2	131	1,2	180	23	DC+ (impulsno f=60Hz)	11,5	290	0,685
Dodatni materijal: ESAB Autorod 5183 Zaštitni plin/prašak: -zaštitni plin: 100% Argon Protok plina: -zaštitnog plina: 16 l/min Pojednosti o žljebljenju/osiguranju taline: --- Temperatura predgrijavanja: 120° Međuslojna temperatura: 100°				Dodatne informacije: 1. Pripremiti rubove lima tako da kut između bude 60° 2. Limove postaviti s razmakom od 2 mm između njih. 3. Prije 3. sloja izbrusiti korijen zavara				

Unos topline se računa prema sljedećem izrazu:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \times \eta \text{ [kJ/mm]} \quad (2)$$

U – napon zavarivanja [V]

I – jakost struje zavarivanja [A]

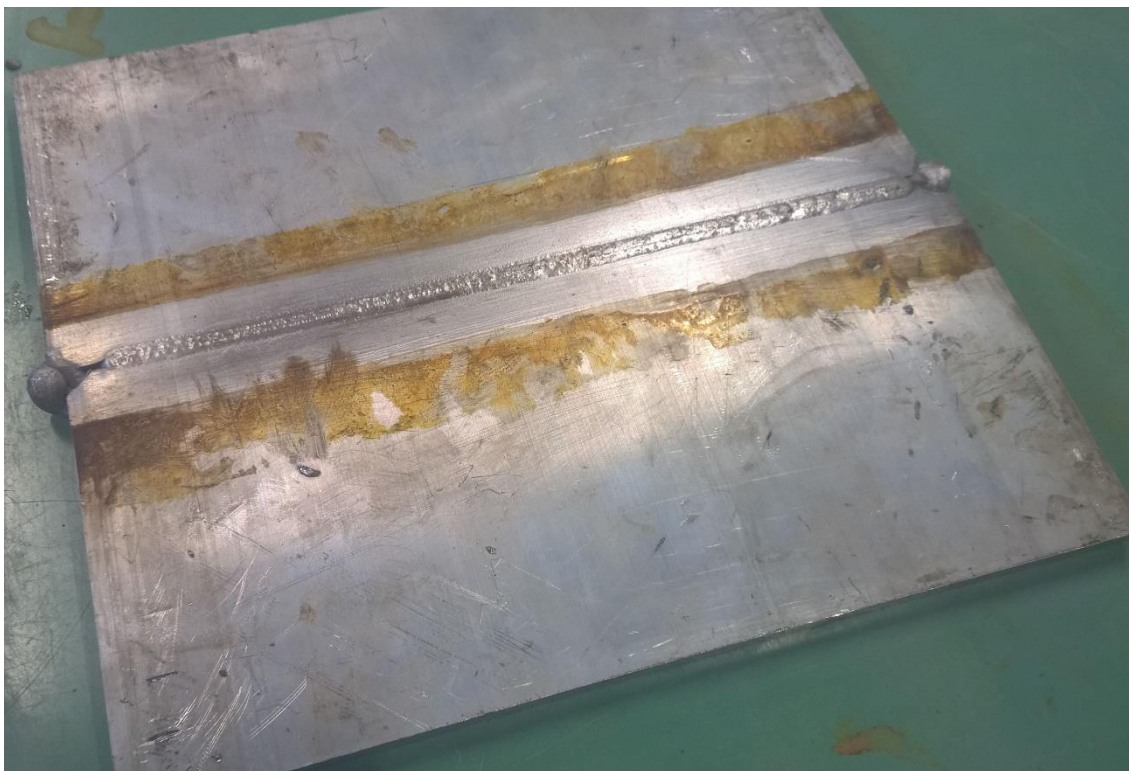
v_z – brzina zavarivanja

η – stupanj iskorištenja (ovisi o postupku zavarivanja, prema normi HRN EN 1011-1 za MIG postupak iznosi 0,8)

Na slikama 24., 25., 26. i 27. prikazani su izgledi zavara.



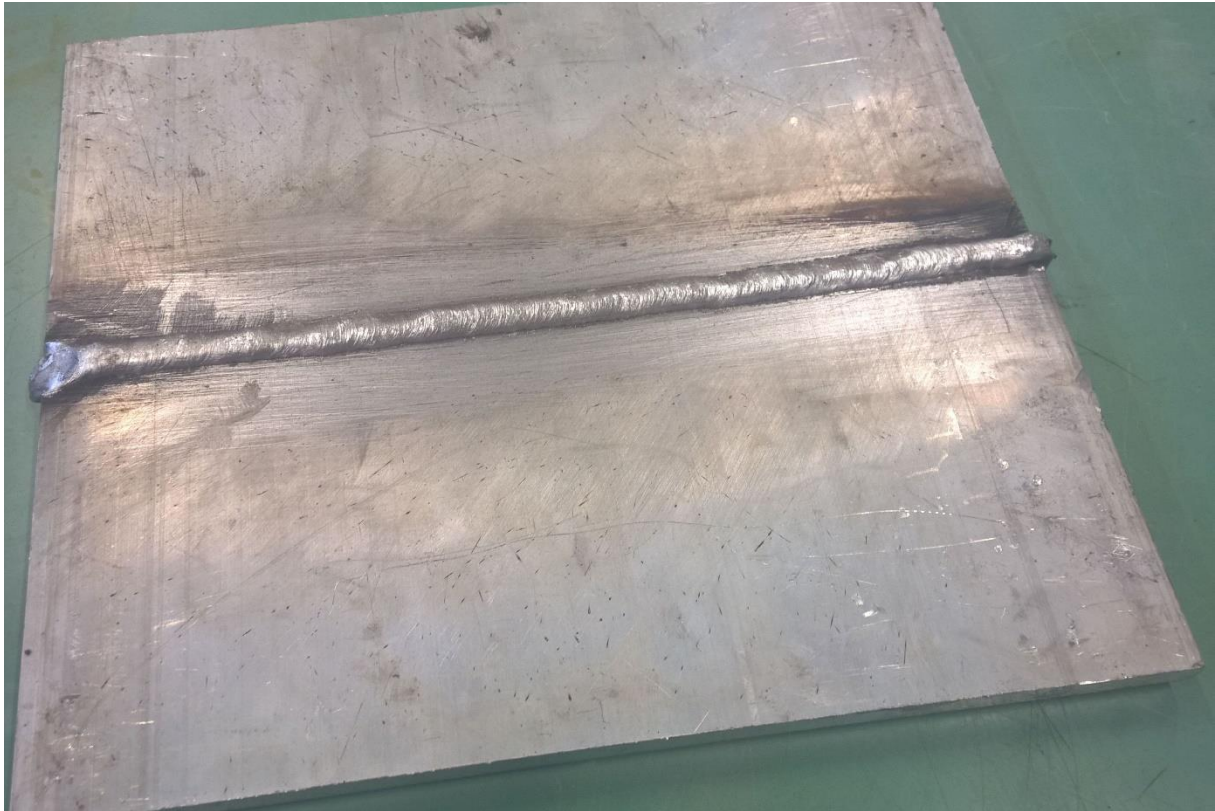
Slika 24. Lice zavara uzorka A



Slika 25. Korijen zavora uzorka A



Slika 26. Lice zavora uzorka B



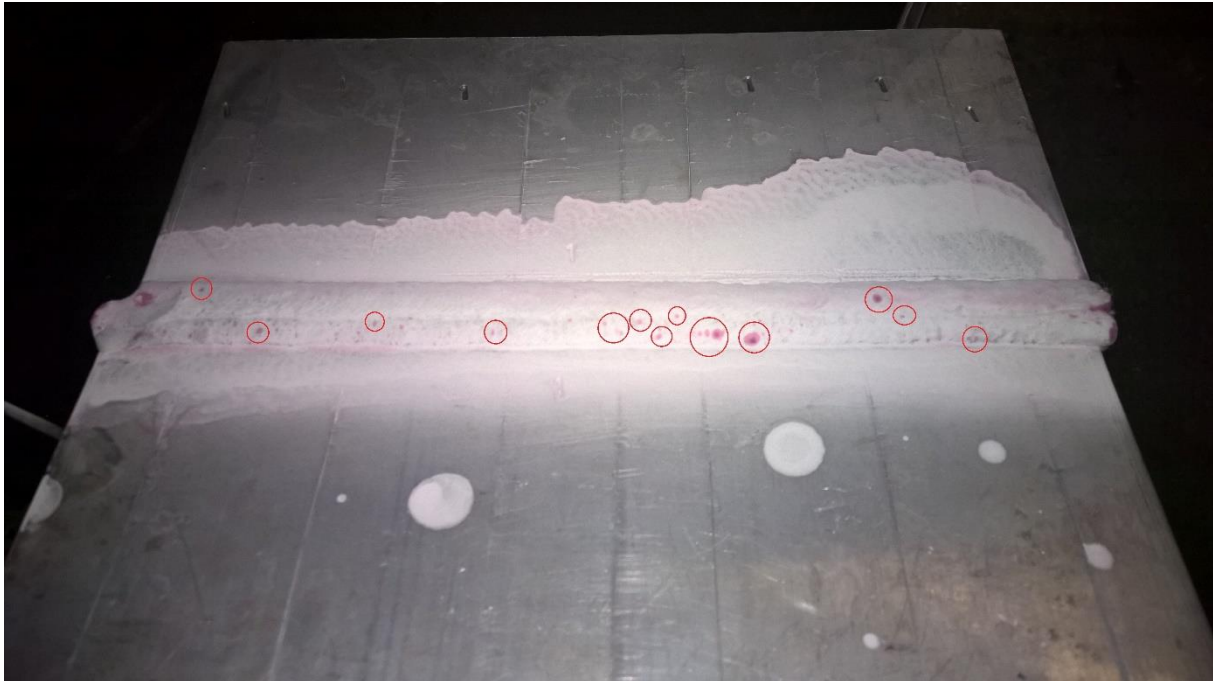
Slika 27. Korijen zavara uzorka B

8.3. Nerazorno ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima je metoda ispitivanja koja omogućuje otkrivanje površinskih nepravilnosti. Postupak se provodi pomoću penetranta, odstranjivača i razvijača.

Postupak se sastoji od 3 koraka:

- Čišćenje površine zavara čistačom Elite BC1 Cleaner/Remover nakon čega se čeka 5 minuta;
- Nanošenje crvenog penetranta ColorPen PWL-1 i puštanje 10-15 minuta da penetrant prodre u svaku pukotinu;
- Ispiranje penetranta pod mlazom vode, sušenja uzoraka i stavljanja razvijača Elite D112A BIO.DEVELOPER i čekanja 5 minuta.



Slika 28. Lice zavara uzorka A nakon ispitivanja penetrantima

Na slici 28. su vidljive manje i veće pukotine duž cijelog zavara.



Slika 29. Korijen zavara uzorka A nakon ispitivanja penetrantima

Na slici 29. nisu vidljive pukotine u korijenu zavara.



Slika 30. Lice zavara uzorka B nakon ispitivanja penetrantima

Na slici 30. vidljive su manje pukotine na licu zavara.

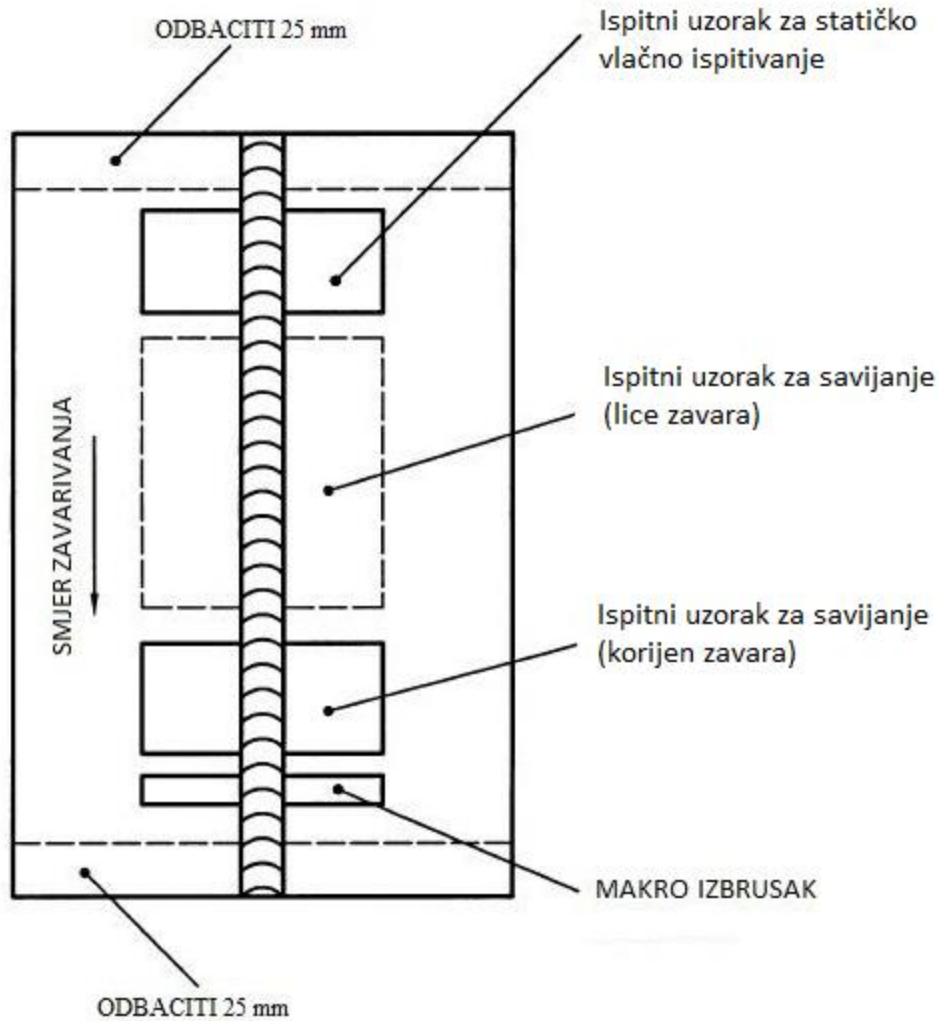


Slika 31. Korijen zavara uzorka B nakon ispitivanja penetrantima

Na slici 31. vidljivo je par manjih pukotina u korijenu zavara.

8.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva

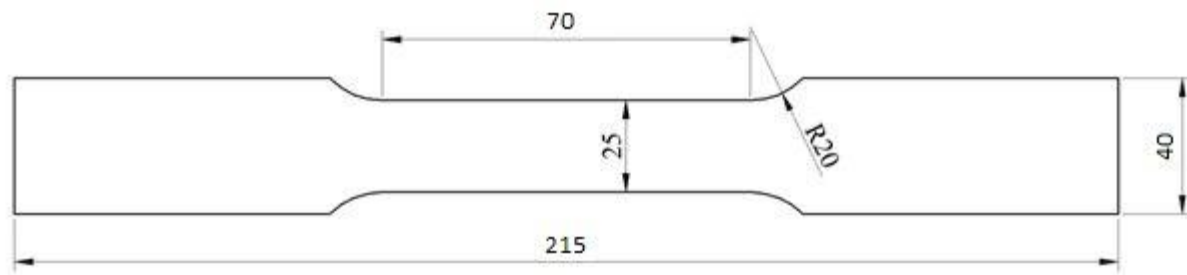
Ispitivanja mehaničkih svojstava bilo je potrebno vršiti prema normi HRN EN ISO 15614-2, međutim kao što je prije navedeno dimenzije uzoraka za zavarivanje nisu ispunjavale tražene minimalne dimenzije zbog čega nije moguće dobiti traženi broj ispitnih uzoraka iz zavarenih spoja. Na slici 32. prikazana su mjesta i broj vađenih ispitnih uzoraka za ovaj eksperimentalni dio rada.



Slika 32. Mjesta za vađenje ispitnih uzoraka iz zavarenog spoja

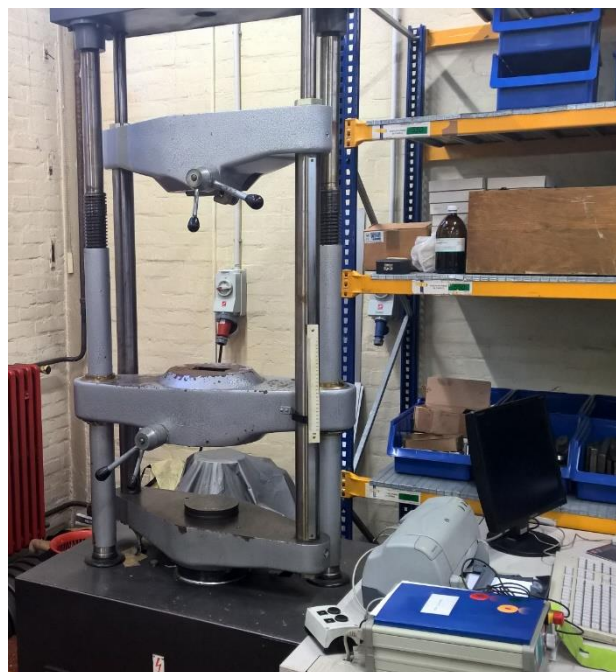
8.4.1. Statičko vlačni pokus

Iz uzoraka A i B bilo je potrebno izraditi ispitne epruvete prema normi HRN EN ISO 4136:2013 za statički vlačni pokus. Epruvete su prvo izrezane na pili te su za statičko vlačni pokus naknadno glodane na točne dimenzije u Laboratoriju za alatne strojeve FSB. Nadvišenja lica i korijena zavora izbrušena su u Laboratoriju za zavarivanje FSB. Na slici 33. prikazane su dimenzije epruvete za statičko vlačni pokus.



Slika 33. Dimenzije epruvete za statičko vlačni pokus

Ispitivanje je izvršeno u Laboratoriju za mehanička svojstva materijala FSB. Za provedbu pokusa korištena je kidalica WPM EU 40 MOD (slika 34.), koja može postići maksimalnu silu od 400 kN. Rezultati vlačne čvrstoće svakog uzorka dobiju se istezanjem epruvete do loma.



Slika 34. Kidalica WPM EU 40 MOD

Na slikama 35., 36., 37. i 38. prikazane su epruvete nakon statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 35. Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 36. Uzorak A nakon statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 37. Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 38. Uzorak B nakon statičkog vlačnog ispitivanja

U tablici 14. prikazani su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Tablica 14. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Epruvete	R_m [MPa]	F_m [kN]	Mjesto puknuća
Uzorak A	146,82	37,034	Osnovni materijal
Uzorak B	157,15	39,436	Osnovni materijal

Iz tablice 14. se može vidjeti da je razlika u sili kidanja manja od 1 %, a iz slika 35.-38. da su epruvete pukle u osnovnom materijala iz čega se može zaključiti da su zavari zadovoljili statičko vlačno ispitivanje.

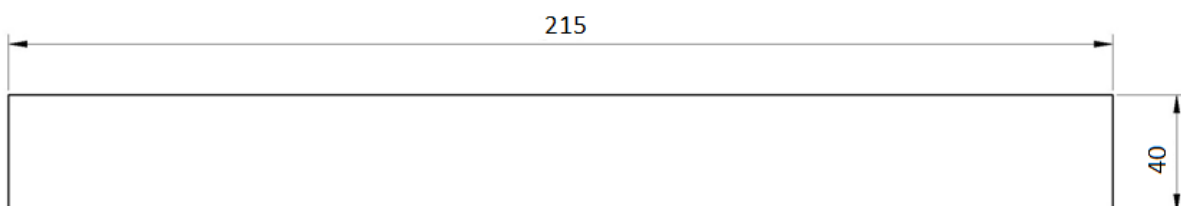
8.4.2. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem je izvršeno u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (slika 39.). Oba uzorka sučeljenog spoja su ispitana poprečnim savijanjem na lice zavara i korijen zavara prema HRN EN ISO 5173:2010. Ispitane su po jedna epruveta na lice zavara Uzorka A i B i po jedna epruveta na korijen zavara Uzorka A i B.



Slika 39. Ispitivanje savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje FSB

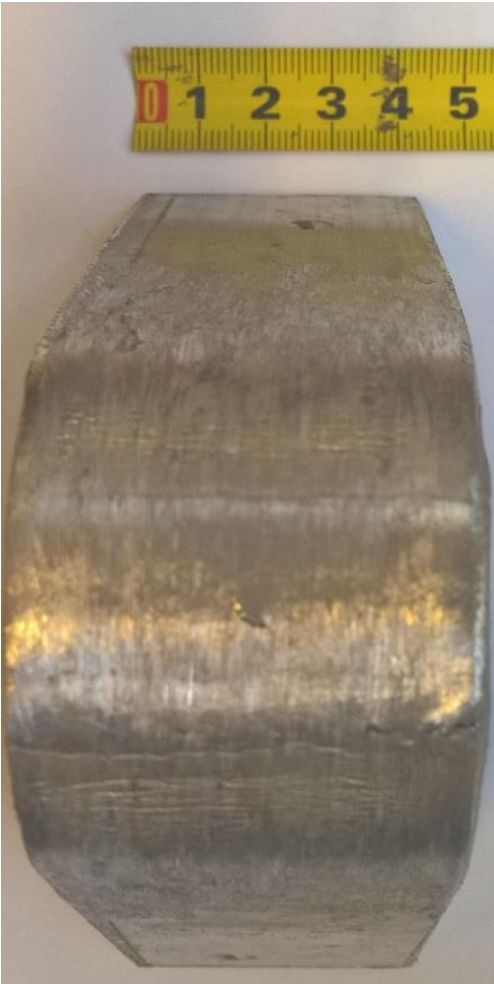

Dimenzije epruvete za savijanje prikazane su na slici 40., a promjer trna na stroju za savijanje iznos 36 mm.





Slika 40. Dimenzije uprivate za savijanje

U tablici 15. prikazani su rezultati savijanja uzorka A, a u tablici 16. uzorka B.

Tablica 15. Rezultati savijanja Uzorka A

Uzorak A	
Lice	Korijen
	

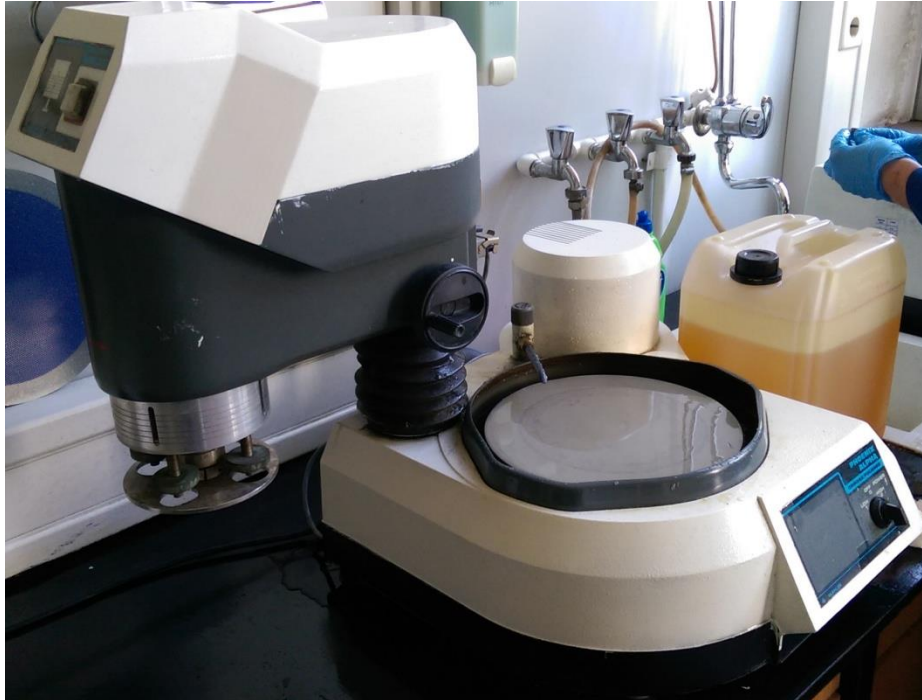
Tablica 16. Rezultati savijanja uzorka B

Uzorak B	
Lice	Korijen
	

Iz tablice 15. može se vidjeti da je došlo do pucanja na licu zavara uzorka A, a u tablici 16. se može vidjeti da je došlo do pucanja na korijenu zavara uzorka B.

8.5. Makro analiza i geometrija zavara

Uzorci za makro analizu izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje FSB, nakon čega su polirani u Laboratoriju za materijalografiju. Poliranje je izvršeno pomoću stroja (slika 41.) koji rotira brusni papir od silikon- karbida (SiC). Brusni papir koji se koristio ima hrapavost 1000.



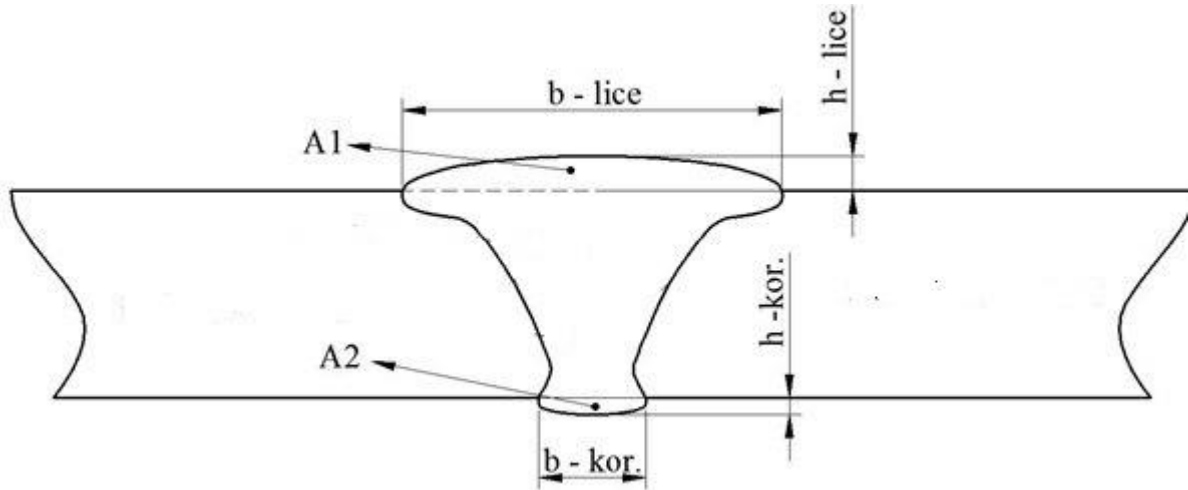
Slika 41. Stroj za poliranje ispitnih uzoraka

Nakon brušenja uzorke je bilo potrebno elektrolitski nagristi u Kellerovom reagentu. Tablica 17. prikazuje kemijski sastav Kellerovog reagenta.

Tablica 17. Kellerov reagent

Kemijski spoj	Volumni udio
HNO ₃	2.5 %
HCL	1.5 %
HF	1%
Destilirana voda	95 %

Geometrija zavora izmjerena je uz pomoć programa ImageJ. Dimenzije geometrije zavora izmjerene su na oba makro uzorka, te su prikazane u tablici 19. Na slici 42. i tablici 18. prikazane su mjerene veličine zavora i njihove oznake.

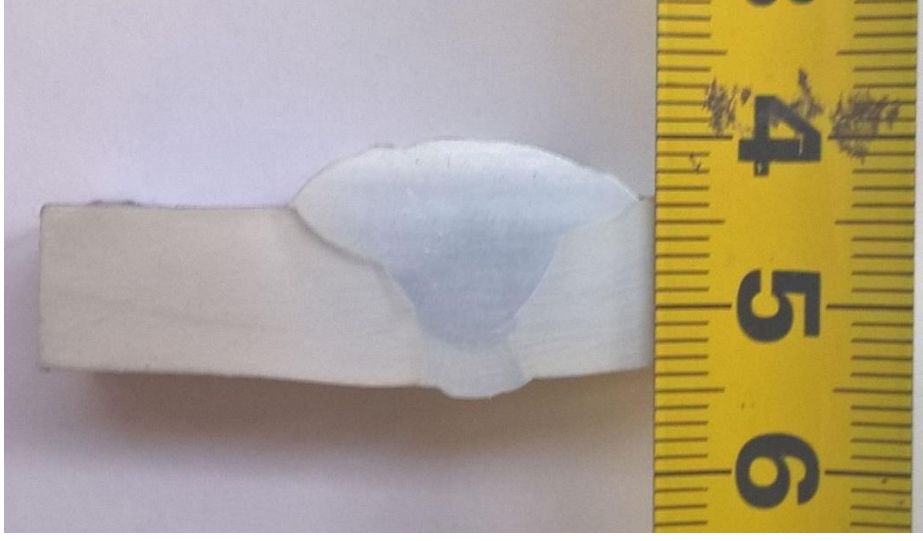
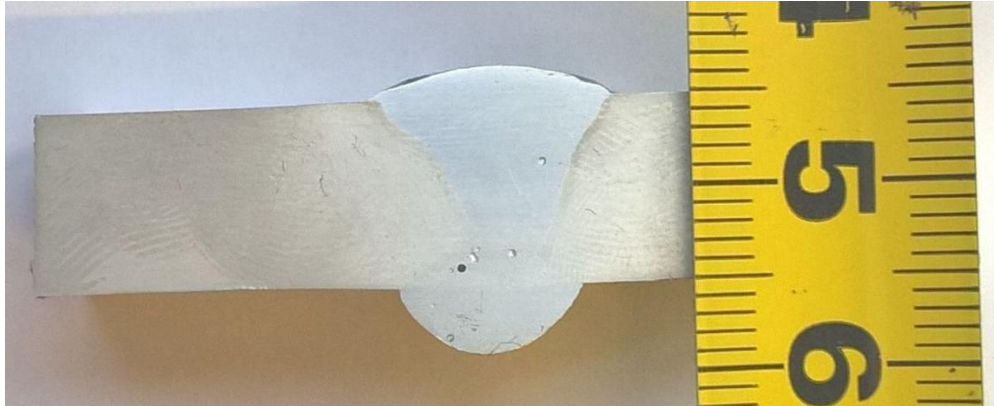


Slika 42. Skica veličine zavora

Tablica 18. Oznake mjerenih veličina zavora

Oznaka	Značenje oznake	Mjerna jedinica
b - lice	širina lica zavora sučeljenog spoja	mm
b - kor.	širina korijena zavora sučeljenog spoja	mm
h - lice	visina lica zavora sučeljenog spoja	mm
h - kor.	visina korijena zavora sučeljenog spoja	mm
A1	površina presjeka nadvišenja lica zavora sučeljenog spoja	mm ²
A2	površina presjeka nadvišenja korijena zavora	mm ²

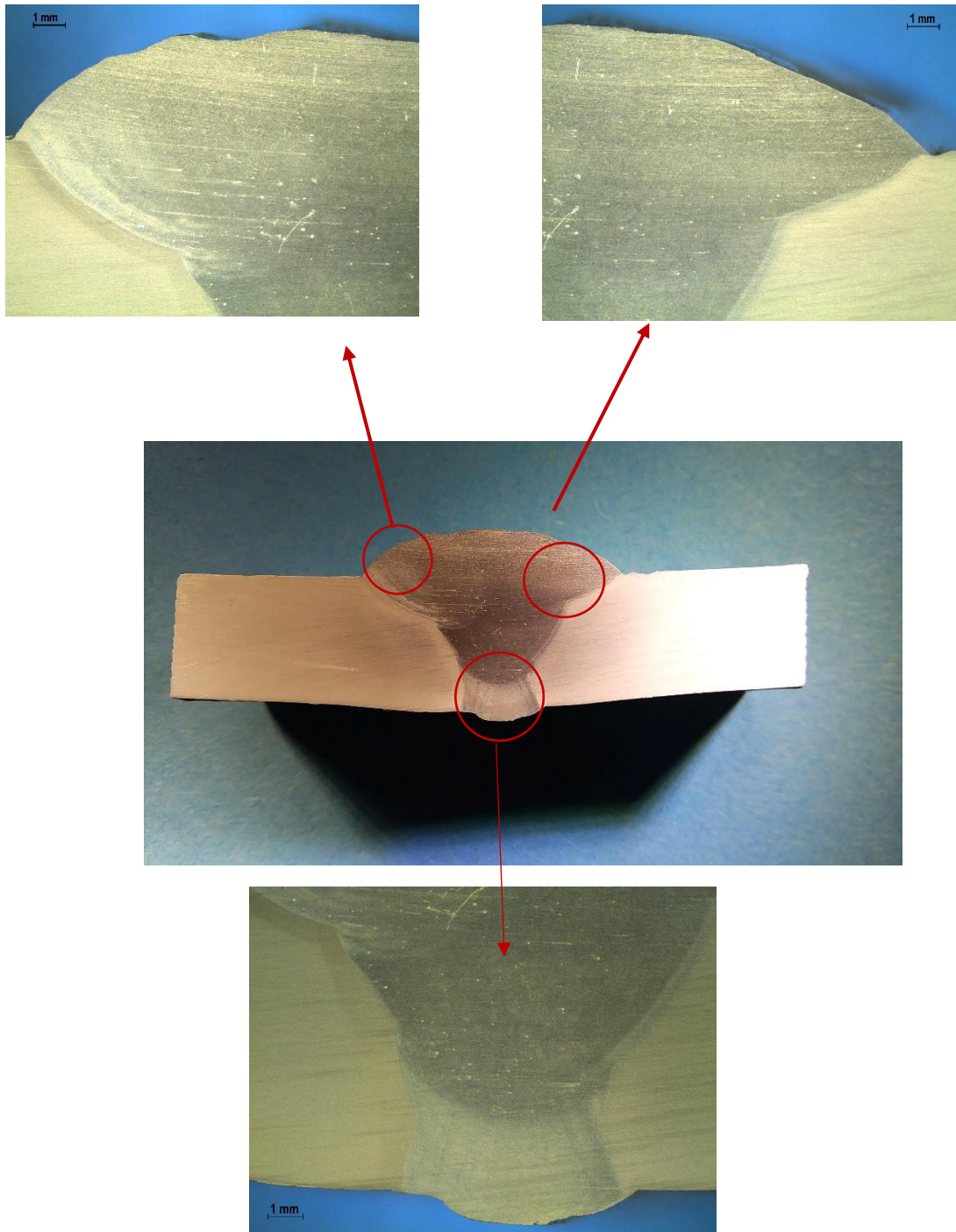
Tablica 19. Makroizbrusci uzoraka

Oznaka uzorka	b - lice [mm]	b - kor. [mm]	h - lice [mm]	h - kor. [mm]	A1 [mm ²]	A2 [mm ²]
	20	6	4	1	56,4	4,9
A						
	12,77	10	1,75	3,8	20	26,68
B						

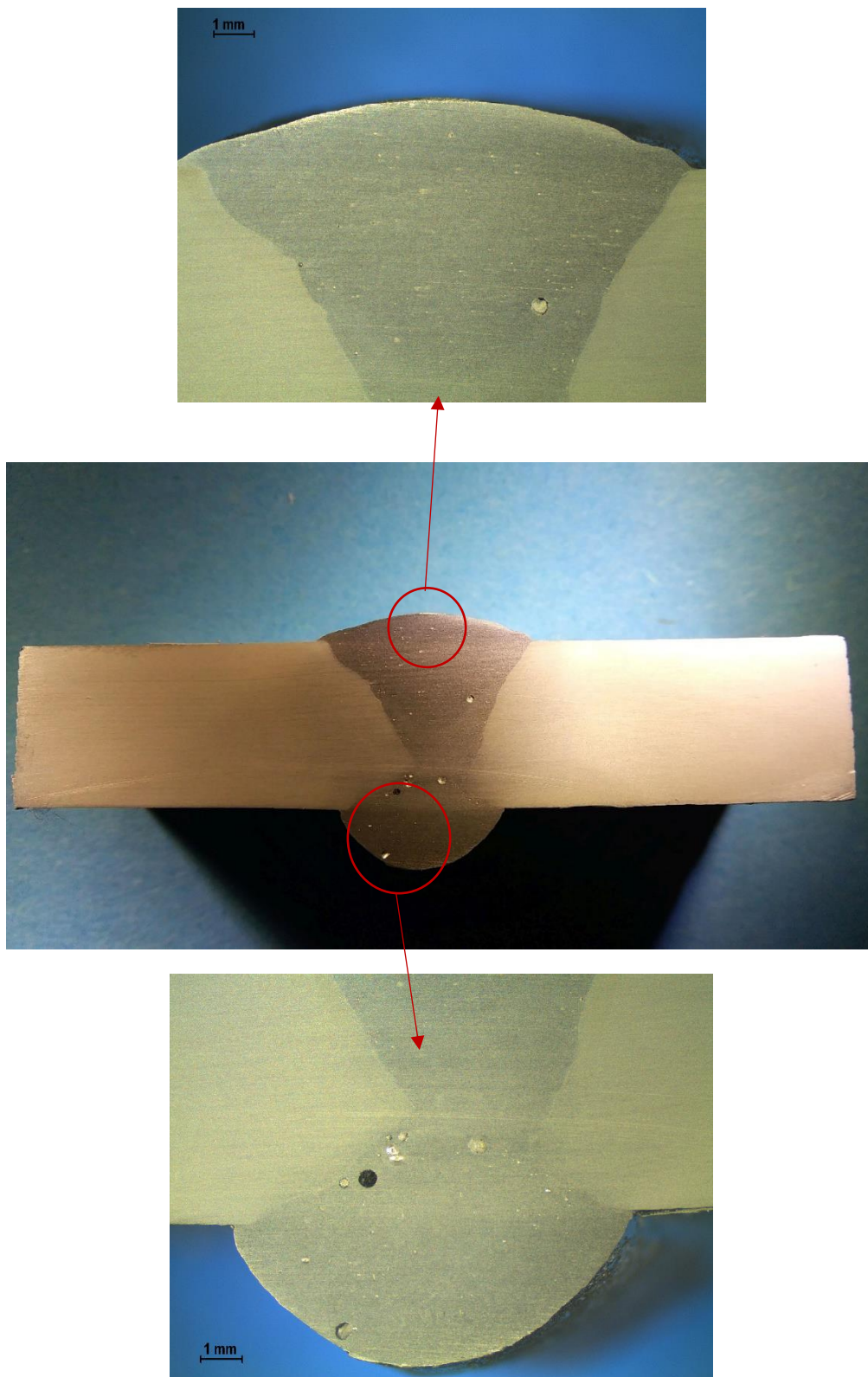
Iz tablice 19. može se vidjeti lagano nadvišenje lica zavara uzorka A i lagano nadvišenje korijena zavara uzorka B.

8.6. Mikroskopska analiza

Mikroskopska analiza je rađena u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB. Makro izbrusci su analizirani pomoću mikroskopa Leica MZ6, a povećanje je iznosilo 10x.



Slika 43. Mikroskopska analiza uzorka A



Slika 44. Mikroskopska analiza uzorka B

Iz slike 39. može se vidjeti prisutnost pora u 2. i 3. sloju presjeka zavara.

Iz slike 40. može se vidjeti smaknutost između korijena zavara i 2. sloja zavara kao i plinski uključci u korijenu zavara i drugom sloju zavara.

9. ZAKLJUČAK

Aluminij je materijal čija je upotreba iz godine u godine sve veća, a samim time i potražnja za njegovim proizvodima. Zavarivanje je jedan od najčešćih načina proizvodnje tih proizvoda, a zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva kao kod svih metalnih spojeva su visoki.

Upotrebom odgovarajućih tehnologija zavarivanja, MIG-impulsno, TIG i elektrootporno zavarivanje, postižu se zadovoljavajući zahtjevi za kvalitetom zavarenih spojeva. Međutim, nije dovoljno samo odabrati način postupka zavarivanja već je potrebno odabrati adekvatnu opremu u samom procesu zavarivanja. To uključuje zaštitni plin, dodatan materijal, odabir tehnike zavarivanja, upotreba podloga za zavarivanje, itd. Kao postupak zavarivanja se uglavnom koristi MIG-impulsni postupak jer on omogućuje kontrolirani prijenos metala sa elektrode na radni komad uz primjenu struje niske jakosti što je pogodno za metala osjetljive na unos topline. Najveći problem pri zavarivanju aluminijskih materijala je poroznost koja uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće i zamor materijala. Poroznost je uzrokovana zaostalim vodikom u zavaru tijekom skrućivanja taline zavara. Da bi se spriječila poroznost potrebno je omogućiti da vodik u velikoj mjeri izađe iz taline zavara. To se može postići predgrijavanjem radnog komada i upotrebom manje brzine zavarivanja što i nije povoljno jer se time dobije manja čvrstoća zavarenog spoja. Poroznost se također može smanjiti upotrebom zaštitnog plina visoke čistoće i upotrebom impulsnog MIG zavarivanja koji svojom promjenom jakosti struje osigurava dobro otplinjavanje vodika iz zavara, uz dobru brzinu zavarivanja. Kao zaštitni plin se koristi argon jer omogućuje uspostavu električnog luka bez rasprskavanja i pruža dobar efekt čišćenja u odnosu na helij. U pravilu se koristi desna tehnika zbog bolje pokrivenosti zaštitnog plina nad mjestom zavara, ali može i lijeva uz veći protok plina. Već je spomenuto da je aluminij osjetljiv na unos topline zbog čega može doći do probijanja električnog luka uz relativno veliku struju zavarivanja. Upotrebom podloga za zavarivanje omogućeno je „držanje“ taline zavara ispod radnog komada, a podloga ujedno i oblikuje korijen zavara. Još jedna prednost im je što nema potrebe za brušenjem i nanošenjem novog sloja zavara.

U eksperimentalnom dijelu provedena su različita ispitivanja navedena u normi HRN EN ISO 15614-2. U rezultatima nerazornog ispitivanja penetrantima vidljivo je da korijen zavara Uzorka A (zavarenog s keramičkom podlogom) nema pukotina, dok korijen Uzorka B (spoj bez korištenja keramičke podloge) ima pukotine. Lice zavara Uzorka A i B imaju površinske pukotine. Pukotine su rezultat neadekvatnih parametara zavarivanja, uglavnom nedovoljnog protoka zaštitnog plina. Ispitivanje savijanjem utvrđeno je da je došlo do pucanja u licu zavara Uzorka A i korijenu zavara uzorka B. Kod statičkog vlačnog ispitivanja je došlo do prekidanja u osnovnom materijalu kod oba uzorka iz čega se može zaključiti da su zavari sa tog stajališta kvalitetno napravljeni. Makroanalizom utvrđena je prisutnost manjih pukotina u 2. i 3. sloju zavara. Kod Uzorka B može se vidjeti smaknutost između korijena i 2. sloja zavara, prisutnost manjih pora u 2. sloju zavara i većih pora u korijenu zavara.

Sa stanovišta mehaničkih svojstava upotrebom keramičke podloge dobiveni su kvalitetniji zavari u korijenu, a samim time i troškovi su manji jer nema potrebe za naknadnom reparaturnom obradom korijena zavara. Sa stanovišta kvalitete cijelog zavarenog spoja, oba uzorka nisu zadovoljila jer je došlo do pogrešaka u zavarenim spojevima. To je posljedica lošeg odabira parametara (količina protoka zaštitnog plina, struja i brzina zavarivanja), međutim korijen zavara Uzorka A je kvalitetniji od Uzorka B zbog korištenja mehaničke podloge koja donekle povisuje toleranciju za odabir parametara zavarivanja.

LITERATURA

- [1] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2002. Zagreb
- [2] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala: Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 3/4 2013.g.
- [3] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2003.
- [4] Kalpakjian; Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed, Pearson Education 2008.
- [5] Kralj S.; Kožuh Z.; Andrić Š.: Priručnik zavarivački i srodni postupci, Zagreb 2015.g
- [6] Grubić K.: Impulsno MIG-MAG zavarivanje i njegova primjena: Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 4/5 1990.g
- [7] Kovačević B.; Živčić.: Zavarivanje aluminjskih materijala (šesti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g.
- [8] Scotti A.; Ponomarev V.; Lucas W.: Journal of Materials Processing Technology, 2012.g
- [9] Pulsed MIG-welding, <http://pdf.directindustry.com/pdf/esab/pulsed-mig-welding/18224-84894.html> , dostupno 04.07.2016.g
- [10] Grubić K.: Čimbenici i njihov utjecaj pri impulsnom MIG zavarivanju: Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 2 1992.g
- [11] Palani P.K.; Murugan N.: Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding: Journal of Materials Processing Technology, 2006.g
- [12] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2003.
- [13] Kralj S.; Andrić Š.: Zavarene aluminijske konstrukcije, dio: Zavarivanje i zavarljivost aluminijskih legura, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb 1990.
- [14] Welding Inspection Cswip: <http://www.slideshare.net/guest831c1e/welding-inspection-cswip> , dostupno 04.07.2016.
- [15] The procedure handbook of arc welding 12th edition, The Lincoln Electric Company, Cleaveland, Ohio
- [16] Priručnik Hobart Guide for Aluminium Welding
- [17] Praveen P.; Yarlagadda P.K.D.V.: Meeting challenges in welding of aluminium alloys through pulse gas metal arc welding: Journal of Materials Processing Technology 164-165, 2005.
- [18] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (treći dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g

- [19] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (peti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [20] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (šesti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [21] Knopp N.; Lorenz H.: MIG welding of aluminium materials made easy, Mundertsbach and Robert Killing, EWM Hightech welding, Solingen, Germany
- [22] Norma HRN EN ISO 9692-3:2000, Zavarivanje i srodni procesi -- Preporuke za pripremu spoja -- 3. dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminjskih legura
- [23] Tehničke upute izvora struje za zavarivanja Welbee P400, <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2585> , dostupno 29.06.2016.g
- [24] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bff851e4f339e88> , dostupno 29.06.2016.g
- [25] http://www.magmaweld.com/mal_5183_aluminum_mig_mag_welding_wires.html , dostupno 29.06.2016.g
- [26] <http://www.esab.co.uk/gb/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410938&tab=1> , dostupno 29.06.2016.g
- [27] http://www.alloysitalia.it/images/Supporti_ceramici.jpg, dostupno 04.07.2016
- [28] Norma HRN EN ISO 15614-2:2005, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 2. dio: Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura
- [29] Mathers G.: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 2002.
- [30] A general review of the causes and acceptance of shape imperfections - Part 2, <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/a-general-review-of-the-causes-and-acceptance-of-shape-imperfections-part-2-068/> , dostupno 04.07.2016.g
- [31] Norma HRN EN ISO 5173:2010, Ispitivanja razaranjem zavara na metalnim materijalima - Ispitivanja savijanjem
- [32] Norma HRN EN ISO 4136:2001, Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima - Poprečno vlačno ispitivanje
- [33] Norma HRN EN ISO 1011-1:2009, Zavarivanje -- Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje

PRILOZI

I. CD-R disc