



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Miroslav Dramićanin

**Uticaj aktivnog premaza na dubinu
uvara pri zavarivanju neretno
egreljivom eliku netopljivom elektrodom u
zaštiti inertnog gasa**
DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2019.



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :			
Identification number, INO :			
Document type, DT :	Monographic publication		
Type of record, TR :	Textual material, printed		
Contents code, CC :	Doctoral Thesis		
Author, AU :	Miroslav Dramićanin		
Mentor, MN :	Prof. Sebastian Baloš		
Title, TI :	Influence of activated flux on the penetration depth in non-consumable electrode welding of stainless steel in inert gas shielding		
Language of text, LT :	Serbian		
Language of abstract, LA :	Serbian / English		
Country of publication, CP :	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP :	Vojvodina		
Publication year, PY :	2019		
Publisher, PB :	Autor's reprint		
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovi a 6		
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/122/70/21/158/0/0		
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering		
Scientific discipline, SD :	Materials and Joining Technologies		
Subject/Key words, S/KW :	Welding, activated flux, gas tungsten arc welding, austenitic stainless steel		
UC			
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad		
Note, N :			
Abstract, AB :	In this doctoral thesis, the selection of solvent, size, type and the content of oxide particles in activated flux aimed at increasing the penetration on austenitic stainless steel in gas tungsten arc welding is presented. Besides activated flux composition, the optimization of welding parameters such as electrode geometry, welding current and welding speed was done. After the selection of successful activated flux formulations and welding parameters, the characterization of mechanical properties, chemical composition and microstructure was determined.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	31.01.2019.		
Defended on, DE :			
Defended Board, DB :	President:	Dr Leposava Šćepanović, Professor Emeritus	Mentor's sign
	Member:	Dr Branka Pilić, Full Professor	
	Member:	Dr Vencislav Grabulov, Principal Research Fellow	
	Member:	Dr Dragan Rajnović, Assistant Professor	
	Member, Mentor:	Dr Sebastian Baloš, Associate Professor	

Zahvalnost

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru profesoru dr Sebastianu Balošu, na ogromnoj podršci, inspiraciji i nesebičnoj pomoći i pruženoj prilici izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se članovima Komisije na dragocjenim naučno stručnim savetima i korisnim sugestijama prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Izražavam zahvalnost za pruženu pomoć kolegama Petru Janjatoviću za dane provedene zavarivanjem i sa mnom, a Stanislavu Simiću za pomoć i provedene pripreme i uzorke. Zahvalan sam Savki Adamović na pomoć i oko izrade prvog aktivnog premaza i Stevanu Vaseleku sa kojim sam taj premaz uspešno testirao. Zahvaljujem se profesorici Branki Pilić i njenim saradnicima na obezbeđenim esticama za aktivne premaze.

Dugujem zahvalnost kolegama sa katedre na neiscrpoj i nemaloj pomoći i oko izrade disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem Ivanu Zabunoviću i firmi Proficut doo, iz Bako Petrovca za opremu na kojoj su zavarivanja izvršena i na upotrebi opreme za rezanje.

Takođe, za veliku pomoć zahvaljujem se Maji Božić na izvršenim ispitivanjima hemijskog sastava, Milošu Bokoroviću na pomoć i pri ispitivanju uzoraka na skeniranjem elektronskom mikroskopu i tehničkim saradnicima Bobanu Ušljebrkić i Radomiru Dukiću na pripremi i izradi uzoraka.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici, devojci i prijateljima koji su mi sve ovo vreme bili velika podrška.

HVALA VAM!

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	CILJ ISTRAŽIVANJA	3
2	TEORIJSKA RAZMATRANJA	4
2.1	OSNOVE ZAVARIVANJA	4
2.1.1	Zavarivanje topljenjem	5
2.1.2	Zavarivanje pritiskom	6
2.1.3	Elementi metala šava	6
2.1.4	Izvori toplote	7
2.1.4.1	Elektri ni luk	7
2.1.5	Izvor struje	9
2.2	TIG	11
2.2.1	Izvor struje	12
2.2.2	Zaštitni gas	14
2.2.3	Mlaznica	15
2.2.4	Pištolj za zavarivanje	16
2.2.5	Elektroda	17
2.2.6	Oblik vrha elektrode	18
2.2.7	Dodatni materijal	20
2.3	A-TIG	21
2.3.1	Aktivni premaz	22
2.3.2	Metode nanošenja aktivnog premaza	23
2.3.3	Marangonijev efekat	23
2.3.4	Zavariva ki luk	26
2.3.5	Faktori koji uti u na performanse kod A-TIG postupka	27
2.3.6	Utica j parametara zavarivanja:	27
2.3.6.1	Ja ina struje zavarivanja	27
2.3.6.2	Brzina zavarivanja	29
2.3.6.3	Dužina elektri nog luka	29
2.3.6.4	Geometrija elektrode	30
2.3.6.5	Zaštitni gas	31
2.3.6.6	Aktivni premaz	33
2.3.7	Utica j aktivnog premaza na mehani ke osobine	35
2.3.7.1	Mikrotvrdo a	35
2.3.7.2	Zatezane karakteristike	36
2.3.8	Sumarni pregled postignutih dubina uvara A-TIG postupkom	38
3	EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	39
3.1	UVODNA ISTRAŽIVANJA	39
3.1.1	Ekspetiment I – Odre ivanje uticaja masenog udela estica TiO_2 u aktivnom premazu na dubinu uvara	39
3.1.2	Ekspetiment II – Odre ivanje uticaja rastvara a	42
3.1.3	Ekspetiment III – Odre ivanje uticaja oblika vrha elektrode i udela nano i submikronskih estica TiO_2	43
3.1.3.1	Rezultati ispitivanja raspodele estica u aktivnom premazu	47
3.1.3.2	Rezultati ispitivanja makrostrukture	48
3.1.3.3	Rezultati ispitivanja mikrostrukture	50
3.1.3.4	Rezultati ispitivanja mikrotvrdo e	52
3.1.4	Ekspetiment IV – Odre ivanje uticaja nano estica SiO_2 i tipa rastvara a	53
3.1.4.1	Rezultati ispitivanja makrostrukture	54
3.1.5	Ekspetiment V – Odre ivanje uticaja udela nano estica TiO_2 i SiO_2	56
3.1.5.1	Rezultati ispitivanja raspodele estica u aktivnom premazu	57
3.1.5.2	Rezultati ispitivanja makrostrukture	58

3.1.5.3	Rezultati ispitivanja mikrostrukture.....	58
3.1.5.4	Rezultati ispitivanja mikrotvrdo e.....	61
3.1.6	<i>Eksperiment VI – Odre ivanje uticaja brzine pretapanja</i>	63
3.1.6.1	Rezultati ispitivanja makrostrukture.....	64
3.1.7	<i>Eksperiment VII – Odre ivanje uticaja ugla vrha elektrode pove anog pre nika</i>	65
3.2	ZAVRŠNA ISTRAŽIVANJA.....	67
3.2.1	<i>Priprema aktivnih premaza i uzoraka, i parametri zavarivanja</i>	67
3.2.2	<i>Vizuelna kontrola i makro ispitivanje</i>	71
3.2.3	<i>Mikroskopska ispitivanja</i>	72
3.2.3.1	Svetlosna mikroskopija	72
3.2.3.2	Skening elektronska mikroskopija	73
3.2.4	<i>Ispitivanje hemijskog sastava</i>	75
3.2.5	<i>Ispitivanje mehani kih osobina</i>	75
3.2.5.1	Ispitivanje zatezanjem	75
3.2.5.2	Ispitivanje savijanjem.....	77
3.2.5.3	Ispitivanje energije udara.....	78
3.2.5.4	Ispitivanje mikrotvrdo e	79
4	REZULTATI ZAVRŠNIH ISTRAŽIVANJA	80
4.1	VIZUELNA KONTROLA I MAKRO ISPITIVANJE.....	80
4.2	MIKROSKOPSKA ISPITIVANJA	83
4.2.1	<i>Svetlosna mikroskopija</i>	83
4.2.2	<i>Skening elektronska mikroskopija</i>	86
4.3	ISPITIVANJE HEMIJSKOG SASTAVA.....	91
4.4	ISPITIVANJE MEHANI KIH OSOBINA.....	91
4.4.1	<i>Ispitivanje zatezanjem</i>	91
4.4.2	<i>Ispitivanje savijanjem</i>	96
4.4.3	<i>Ispitivanje energije udara</i>	98
4.4.4	<i>Ispitivanje mikrotvrdo e</i>	102
5	DISKUSIJA	104
5.1	UVODNA ISTRAŽIVANJA.....	104
5.1.1	<i>Eksperiment I – Odre ivanje uticaja masenog udela estica TiO₂ u aktivnom premazu na dubinu uvara</i>	105
5.1.2	<i>Eksperiment II – Odre ivanje uticaja rastvara a</i>	105
5.1.3	<i>Eksperiment III – Odre ivanje uticaja oblika vrha elektrode i udela nano i submikronskih estica TiO₂</i>	105
5.1.4	<i>Eksperiment IV – Odre ivanje uticaja nano estica SiO₂ i tipa rastvara a</i>	106
5.1.5	<i>Eksperiment V – Odre ivanje uticaja udela nano estica TiO₂ i SiO₂</i>	107
5.1.6	<i>Eksperiment VI – Odre ivanje uticaja brzine pretapanja</i>	107
5.1.7	<i>Eksperiment VII – Odre ivanje uticaja ugla vrha elektrode pove anog pre nika</i>	108
5.2	ZAVRŠNA ISTRAŽIVANJA.....	108
5.2.1	<i>Vizuelna kontrola i makro ispitivanje</i>	108
5.2.2	<i>Mikroskopska ispitivanja</i>	109
5.2.3	<i>Hemijski sastav</i>	110
5.2.4	<i>Mehani ka ispitivanja</i>	110
5.2.4.1	Ispitivanje zatezanjem	110
5.2.4.2	Ispitivanje savijanjem.....	113
5.2.4.3	Ispitivanje energija udara.....	113
5.2.4.4	Ispitivanje mikrotvrdo e	113
5.2.4.5	Uticaj aktivnog premaza na celokupne mehani ke osobine	114
6	ZAKLJU CI	115
7	LITERATURA.....	118

1 Uvod

Konstrukcije i proizvodi se često sastoje iz više delova. Delovi se sastavljaju u celinu spajanjem razdvojivom vezom, vijcima, ili nerazdvojivom vezom, zakivcima i zavarivanjem. Zavarivanje [1] predstavlja tehnološki proces gde se vrši uspostavljanje međuatomskih veza između dva ili više delova koji su metalurški kompatibilni. To znači da je moguće spajanje delova između ostalih od istih materijala, ali i raznorodnih. Tako je moguće spajanje metala sa metalom, metala sa nemetalom i nemetala sa nemetalom. Spajanje delova zavarivanjem je moguće topljenjem ili pritiskom sa i bez upotrebe dodatnog materijala. Najčešće se koriste postupci zavarivanja koji su bazirani na lokalnom zagrevanju materijala iznad temperature topljenja, nakon čega spoj nastaje kroz vršenje zajedničkog rastopa. Kod zavarivanja pritiskom, deo se zagreva do temperature ispod tačke topljenja, a dodatnim dejstvom sile se vrši spajanje [1].

Proces zavarivanja datira još od otkrića metala. Najstariji proces zavarivanja je zavarivanje pod pritiskom, odnosno kovačko zavarivanje. Međutim razvoj savremenih postupaka zavarivanja počinje krajem 19. veka, a značajna primena od sredine 20. veka. Danas, zavarivanje predstavlja jedan od najvažnijih tehnoloških procesa u savremenoj industriji. Zavarivanje ima veliku primenu u automobilskoj industriji, mašingradnji, brodogradnji, građevini, procesnoj industriji i reparaciji delova [2].

U industriji veliki zahtev je da delovi budu korozijski postojani pa se tu upotrebljavaju visokolegirani nerđajući čelici. Nerđajući čelici je moguće zavariti uz određenu proceduru kako bi kvalitet zavarenog spoja bio dobar. Zavarivanje ovih materijala je najčešće: nerđajuće elektrode u zavarivanju (REL), zavarivanje u inertnom gasu topljivom elektrodom (MIG - Metal Inert Gas) i zavarivanje u inertnom gasu netopljivom elektrodom (TIG - Tungsten Inert Gas).

Zavarivanje TIG postupkom je jedan od dominantnih postupaka pri zavarivanju nerđajućeg čelika topljenjem metala. Toplotna energija se dobija električnim lukom koji se uspostavlja i održava između netopljive elektrode od volframa ili njegovih legura i radnog komada [3]. Ovaj postupak ima veliku primenu jer je oprema za zavarivanje jeftina, a kvalitet spoja je visok, kako po pitanju mehaničkih osobina tako i po izgledu metala šava. Ovom metodom je moguće zavarivati u svim položajima zavarivanja. TIG postupak ima naročito veliku primenu kod zavarivanja limova, dok kod debljih delova se retko koristi, zbog male dubine uvara pri prolazu. Za zavarivanje debljih materijala potrebna je priprema žljeba i zavarivanje se izvodi u više prolaza. Priprema žljeba iziskuje dodatno vreme, dodatni materijal, veći utrošak električne energije i vremena, što značajno povećava troškove i što smanjuje proizvodnost i poskupljuje proizvod [4].

Postoje pokušaji da se poveća produktivnost TIG zavarivanja. Jedan od uspešnijih je primenom aktivnog premaza i naziva se zavarivanje u zaštitnom gasu sa netopljivom elektrodom sa aktivnim premazom (A-TIG - Activating flux Tungsten Inert Gas). Prvi rad sa upotrebom aktivnog premaza pri zavarivanju je objavljen 1966. godine na Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences, Ukrajina [5]. Tokom A-TIG postupka na površinu materijala koji se zavaruje nanosi se tanak sloj suspenzije koja predstavlja mešavinu oksida, hlorida i fluorida, koji su rastvoreni u acetonu ili alkoholu

u određenom odnosu [6, 7]. Na površinu uzorka aktivni premaz se nanosi četkom ili rasprskavanjem u širini 10-15 mm. Kad se premaz osuši vrši se klasično zavarivanje TIG postupkom.

Tokom početnih istraživanja na titaniju, ustanovljeno je da premaz povoljno utiče na poboljšanje mehaničkih osobina, povećava dubinu uvara i poboljšava oblik metalne šava. Ubrzo se A-TIG postupak počeo primenjivati za zavarivanje titanijuma i njegovih legura [8]. Pomenute prednosti A-TIG postupka dovele su do toga da postane zanimljiv vojnoj i avio industriji. Nakon toga iz nepoznatih razloga prestalo se sa istraživanjem A-TIG postupka, sve do 1990.g., kada je jedan od istraživača sa Paton Electric instituta prelaskom u TWI - Kembridž pokrenuo interesovanje o premazima za A-TIG. Nakon toga su počela nova istraživanja i objavljen je veliki broj radova o primeni A-TIG postupka pri zavarivanju nerđajućih čelika i legura titanijuma i legura nikla [4, 9].

1.1 Cilj istraživanja

Postoji veliki broj uticajnih faktora koji uti u na pove anje dubine uvara kod TIG zavarivanja (brzina zavarivanja, oblik vrha elektrode, ja ina struje, dužina elektri nog luka, zaštitni gas), stoga je neophodno sve te faktore analizirati i varirati kako bi se došlo do željenih rezultata. Dubina uvara je dubina do koje dolazi do topljenja osnovnog materijala. Što je ve a dubina uvara, brzina dobijanja zavarenog spoja je ve a, a samim tim troškovi manji kroz uštede vezane sa dodatni materijal i zaštitni gas. Osim navedenih parametara najve i uticaj na dubinu uvara ima upotreba aktivnog premaza koji se tipi no sastoji od oksidnih estica i rastvara a.

Cilj istraživanja je da se odaberu odgovaraju e komponente aktivnog premaza koje bi rezultirale najve om dubinom uvara na ner aju em eliku sa zadovoljavaju im mehani kim osobinama.

Prva faza istraživanja bi e vezana za odabir masenog udela estica i rastvara a u aktivnom premazu za dobijanje najve e dubine uvara. U drugoj fazi bi e ispitan uticaj veli ine i vrste estica u aktivnom premazu na dubinu uvara, dok e se u tre oj fazi vršiti mešanje razli itih vrsta estica u aktivnom premazu i ispitati uticaj na dubinu uvara.

Na osnovu dobijenih rezultata iz prve faze utvrdi e se koji maseni udeo i rastvara je potrebno koristiti u drugoj fazi, kao rezultat druge faze zna e se veli ina i vrsta estica potrebnih za tre u fazu u kojoj e se odrediti u kom odnosu je potrebno pomešati razli ite vrsta estica u aktivnom premazu. Nakon odabira komponenti za aktivni premaz koji rezultira najve om dubinom uvara, bi e izvršena zavarivanja na uzorcima od ner aju eg elika na kojima e se izvršiti karakterizacija zavarenog spoja.

Zavareni uzorci ispita e se slede im metodama: ispitivanje zatezanjem, savijanjem, ispitivanje energije udara instrumentiranim Šarpijevim klatnom, ispitivanje tvrdo e, ispitivanje hemijskog sastava metala šava, zone uticaja toplote i osnovnog materijala, makro ispitivanje, ispitivanje mikrostrukture pomo u svetlosnog mikroskopa (SM) i skening elektronskog mikroskopa (SEM), kao i elektronska mikro analiza (EDS)

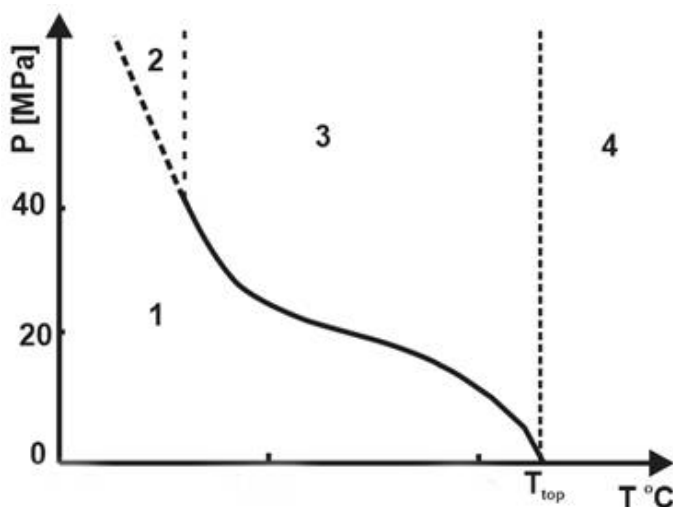
Upotrebom ovakvih premaza bi se postigla velika ušteda smanjivanjem: vremena potrebnog za pripremu žleba za zavarivanje, smanjivanjem broja prolaza, i manjom upotrebom dodatnog materijala. Sve ovo bi rezultiralo velikom vremenskom, a samim tim i finansijskom uštedom.

2 Teorijska razmatranja

2.1 Osnove zavarivanja

Zavarivanje predstavlja proces spajanja dva dela u kome se njihovi atomi dovode na rastojanje koje približno odgovara parametru kristalne rešetke materijala, ime dolazi do uspostavljanja međuatomskih veza i formiranja nerazdvojivog spoja. S obzirom da je za proces zavarivanja potrebno utrošiti određenu količinu toplotne i mehaničke energije prema stranoj i domaćoj literaturi prepoznate su različite oblasti zavarivanja koje su zavisne od pritiska i temperature [1, 2, 10].

Prema dijagramu na slici 2.1 poznate su 4 oblasti zavarivanja koje zavise od pritiska i temperature. Oblast 1 predstavlja oblast u kojoj je nemoguće zavarivanje usled nedovoljne vrednosti pritiska i temperature. U oblasti 2, zavarivanje se ostvaruje dejstvom velikim pritiskom (hladno zavarivanje pritiskom), dok je u oblasti 3 omogućeno zavarivanje kombinacijom pritiska i temperature (toplo zavarivanje pritiskom). Oblast 4, predstavlja oblast kod koje se zavarivanje izvodi samo lokalnim topljenjem i ova oblast pokriva najveći broj postupaka zavarivanja [1, 2, 10].



Slika 2.1 Oblasti zavarivanja u zavisnosti od pritiska i temperature [1, 2]

Na osnovu dijagrama na slici 2.1. izvršena je podela zavarivanja:

- Zavarivanje topljenjem (oblast 4)
- Zavarivanje pritiskom (oblast 2 i 3)

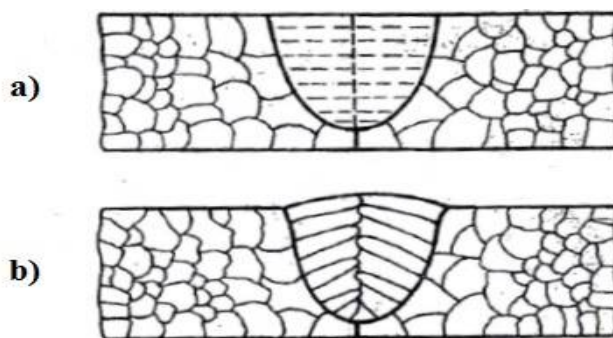
Svaki od pomenutih postupaka se mogu dodatno podeliti na još postupaka. U tabeli 2.1 je prikazana jedna od podela po standardu SRPS EN 14610:2012, gde se ispred naziva svakog postupka nalazi i broj kojim je ta metoda definisana standardom EN ISO 4063:2007.

Tabela 2.1 Klasifikacija postupaka zavarivanja prema EN ISO 14610:2012

Zavarivanje topljenjem		Zavarivanje pritiskom	
1	Elektrolu no zavarivanje	2	Elektrootporno zavarivanje
111	Obloženom elektrodom – E	21	Ta kasto
114	Punjenom žicom	22	Šavno
12	Pod praškom – EPP	23	Bradavi asto
13	Topljivom elektrodom žicom u zaštiti gasa	24	Su eono varni enjem
131	Zaštita u inertnom gasu – MIG	25	Su eono zbijanjem
135	Zaštita u aktivnom gasu – MAG	4	Zavarivanje u vrstom stanju
14	Netopljivom elektrodom u zaštiti gasa	41	Ultrazvukom
141	Inertni gas – TIG	42	Trenjem
15	Plazmom	43	Kova ko
185	Magnetno elektrolu no rotiraju im lukom	44	Eksplozijom
3	Gasno zavarivanje	45	Difuzijom
7	Drugi postupci zavarivanja topljenjem	48	Na hladno
71	Aluminotermitsko	7	Drugi postupci zavarivanja pritiskom
72	Elektri no pod troskom – EPT	71	Aluminotermitsko
751	Laserom	74	Indukciono
76	Elektronskim snopom		

2.1.1 Zavarivanje topljenjem

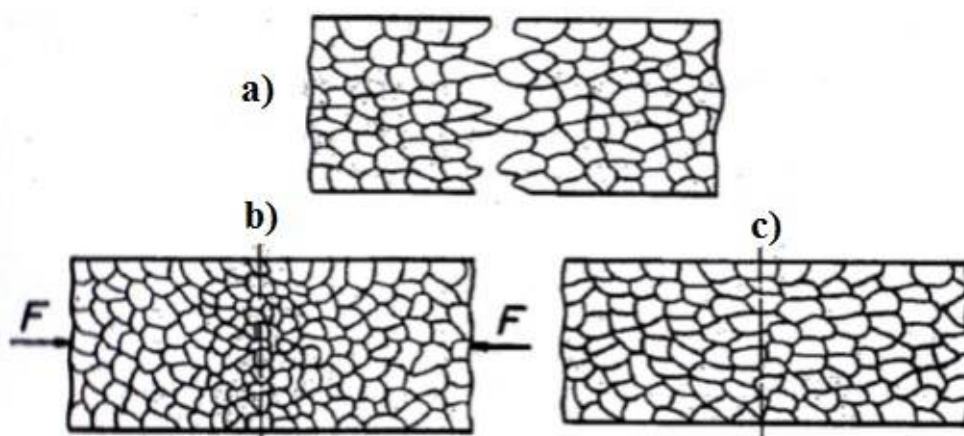
Zavarivanje topljenjem nastaje tako što se materijali lokalno zagrevaju na mestu spoja iznad ta ke topljenja tako da se njihovi rastopi mešaju i o vrš avaju [1]. Zbog lokalnog zagrevanja i relativno brzog hla enja u metalu šava nastaje specifi na dendritska mikrostruktura (slika 2.2).



Slika 2.2 Izgled metal šava dobijen zavarivanjem topljenjem [1]
a) Pre o vrš avanja; b) Nakon o vrš avanja

2.1.2 Zavarivanje pritiskom

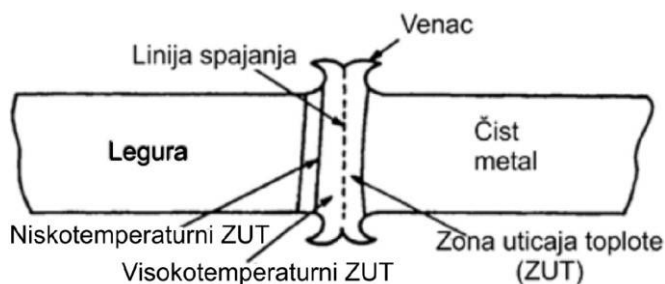
Zavarivanje pritiskom prema dijagramu na slici 2.1 pripada oblast 2, gde je potreban veoma veliki pritisak kako bi došlo do spajanja i oblast 3 gde se materijal zagreva ispod tačke topljenja i nakon toga deluje dejstvom sile pritiska (F). Pod terminom zavarivanje pritiskom se podrazumeva kombinacija toplote i pritiska, odnosno toplo zavarivanje pritiskom. Na slici 2.3 prikazana je mikrostruktura pre (slika 2.3a) i posle zavarivanja pritiskom (slika 2.3b i c). Uočljivo je da na mestu spoja usled velikih sila dolazi do plastične deformacije i usitnjavanja strukture gde temperatura poboljšava difuziju i dovodi do rekristalizacije [1, 2].



Slika 2.3 Izgled metala šava dobijen zavarivanjem pritiskom [1]:

a) pre dejstva sile, b) posle delovanja sile pritiska (F), c) posle difuzije i rekristalizacije

Nakon zavarivanja u zoni kontakta nastaje metal šava, odnosno materijal koji je pri zavarivanju omekšan formira metal šava [1]. Kao što je prikazano na slikama 2.2 i 2.3 u zavisnosti od načina zavarivanja razlikuju se stvaranje metala šava. Na slici 2.4 prikazan je zavareni spoj dobijen suveonim elektrootpornim zavarivanjem [10].

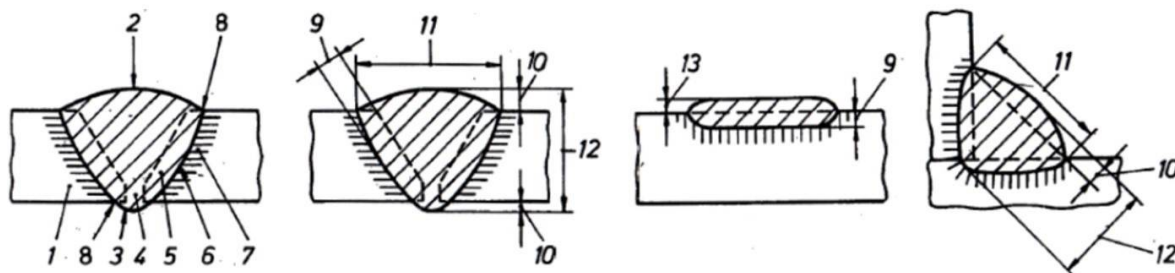


Slika 2.4 Izgled zavarenog spoja kod suveonog elektrootpornog zavarivanja [10]

2.1.3 Elementi metala šava

Elementi metala šava zavarenim nekom od metoda topljenjem prikazani su na slici 2.5. Zavareni spoj predstavlja celinu koja se sastoji iz osnovnog materijala 1 (OM) i metala šava (MŠ), koga čine elementi: lice šava - 2, nali je šava - 3, koren šava - 4 i ivica

šava - 8. Prilikom zavarivanja topljenjem deo osnovnog materijala se rastapa i formira metal šava, rastopljeni deo se zove uvar - 5. Uvar je oivi en sa linijom topljenja - 6, na osnovu koje se određuje dubina uvara - 9. Oblast u OM uz MŠ se naziva zona uticaja toplote (ZUT) - 7, to je oblast u kojoj je zbog visoke temperature dolazi do promene mikrostrukture. Deo metala šava koji je deblji od OM naziva se nadvišenje šava - 10, a zajedno sa OM daje debljinu šava - 12. Rastojanje od ivice šava sa jedne do druge strane je širina šava - 11. Nadvišenje šava kod procesa navarivanja se zove debljina navarivanja - 13.



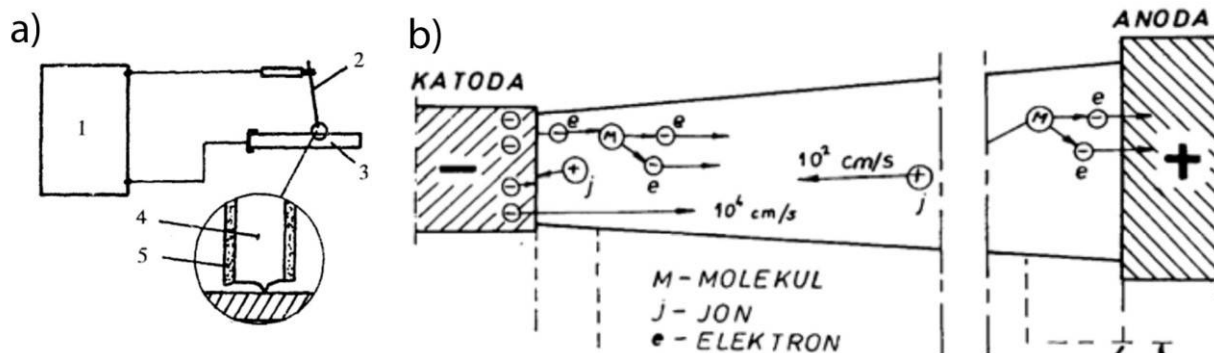
Slika 2.5 Elementi zavarenog spoja kod zavarivanja topljenjem [2]

2.1.4 Izvori toplote

Kod zavarivanja topljenjem koriste se različiti izvori toplote (tabela 2.1). Jedan od najčešćih izvora toplote je električni luk koji se uspostavlja između osnovnog materijala i elektrode. Razlikuju se dve metode elektrolu nog zavarivanja u zavisnosti da li je elektroda ujedno dodatni materijal tj. sa topljivom elektrodom, ili je elektroda netopljiva pa je dodatni materijal u obliku žice. Metode sa topljivom elektrodom su: ručno elektrolu no zavarivanje (REL), elektrolu no zavarivanje pod praškom (EPP), elektrolu no zavarivanje sa topljivom elektrodom u zaštitnom gasu koji može biti inertan odnosno, argon i helijum (MIG) ili aktivan gas, odnosno CO₂ (MAG) i zavarivanja u zaštitnom inertnom gasu sa netopljivom elektrodom (TIG).

2.1.4.1 Električni luk

Električni luk je usmereno kretanje elektrona kroz jonizovani vazduh ili gas. Kako je vazduh dielektrikum, da bi došlo do protoka struje u njemu se moraju naći joni i elektroni. Oni mogu nastati uspostavljanjem luka kratkim spojem kao posledica mikro neravnina gde do kratkog spoja dolazi u malim tačkama (slika 2.6a). Mala površina spoja izaziva veliku gustinu struje (10^2 - 10^5 A/cm²) što za posledicu ima trenutno lokalno rastapanje osnovnog materijala i elektrode kao i isparavanje pojedinih elemenata. Metalna para sadrži elektrone i jone koji pod dejstvom napona praznog hoda se usmeravaju. Velikom brzinom joni se kreću ka katodi, dok elektroni ka anodi i pri kretanju se sudaraju sa okolnim atomima stvarajući nove jone i elektrone. Na ovaj način se uspostavlja njihovo kretanje koje pomaže u formiranju i održavanju električnog luka (slika 2.6b) [1, 2, 11].

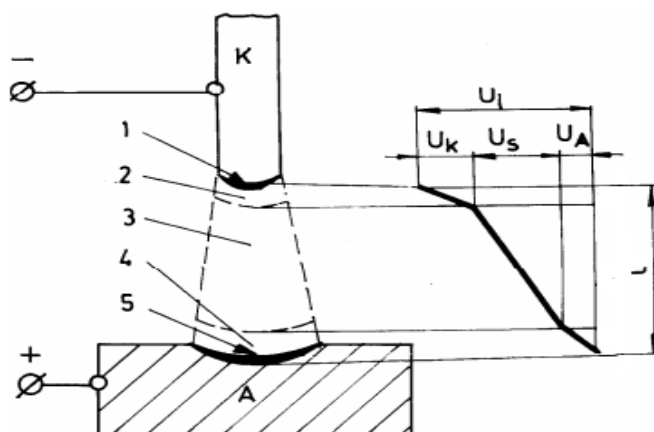


Slika 2.6 Elektri ni luk[12]: a) šema uspostavljanja elektri nog luka (1- izvor struje, 2- elektroda, 3- radni komad, 4- jezgro elektrode 5- obloga elektrode, b) oblasti elektri nog luka

Elektri ni luk se sastoji iz nekoliko oblasti što je prikazano na slici 2.7, ali njihove pozicije se mogu razlikovati u zavisnosti od vrste struje:

- Jednosmerna:
 - Direktna (prava) polarnost je kada elektroda ima ulogu katode, a osnovni materijal je anoda.
 - Indirektna polarnost (obrnuta polarnost) je kada elektroda predstavlja anodu, a osnovni materijal katodu.
- Naizmeni na.

Na slici 2.7 je prikazana šema elektri nog luka kod jednosmerne struje direktne polarnosti. Katoda je predstavljena brojem 1, uz katodu nalazi se i katodna mrlja (2), sa druge strane je anoda koja je predstavljena brojem 5 uz koju se nalazi anodna mrlja (4). Izme u katodne mrlje, kojoj odgovara pad napona U_k i anodne mrlje kojoj odgovara pad napona U_a , nalazi stub luka (3) sa padom napona U_s . Rastojanje od anode do katode je dužina elektri nog luka (l) [1, 10].

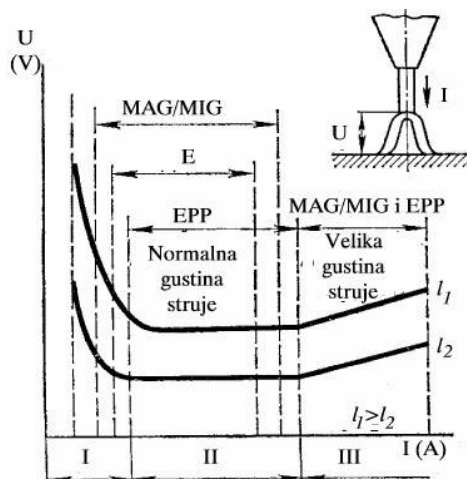


Slika 2.7 Šema elektri nog luka direktne (prave) polarnosti [1]

Za konstanto održanje elektri nog luka zasluženi su elektroni koji nastaju u katodnoj mrlji. Me utim na stabilnost elektri nog luka uti e vrsta struje koja se koristi. Luk je stabilniji ukoliko je to jednosmerna struja, jer se kod naizmeni ne struje zbog promene smera esto prolazi kroz „0“ što izaziva nestabilnost luka. Stabilnost elektri nog luka se može posti i sniženjem potencijala jonizacije dodavanjem jedinjenja na bazi K, Na,

Ca i oksida Fe u oblogu elektrode ili prah, kao i upotrebom zaštitnih gasova Ar, He i CO₂. Međutim zaštitni gasovi strujanjem hlade električni luk i na taj način smanjuju njegovu stabilnost, što je posebno izraženo kod CO₂. Zbog svega navedenog najčešće se koristi jednosmerna struja za zavarivanje [2, 11].

Zbog varijacija i promene broja elektrona u električnom luku, on se ne može smatrati klasičnim provodnikom na koga se može primeniti Ohmov zakon. Zavisnost napona od jačine struje kod električnog luka naziva se statička karakteristika električnog luka. Na slici 2.8 su prikazane dve dužine električnog luka l_1 i l_2 gde se može videti da luk dužine l_1 ima veću toplotnu moć koja zavisi od napona i jačine struje [2, 13].



Slika 2.8 Statička karakteristika električnog luka [12]

Zavisnost napona od jačine struje kod električnog luka ima tri uočljive oblasti:

- I. „Ajrtonova oblast“ u kojoj napon opada sa porastom jačine struje
- II. „Omova oblast“ u kojoj je napon prilično konstantan
- III. Oblast gde napon raste sa porastom jačine struje.

Na osnovu statičke karakteristike luka, odnosno jačine struje i napona prikazano je koji proces zavarivanja je pogodan u kojoj oblasti.

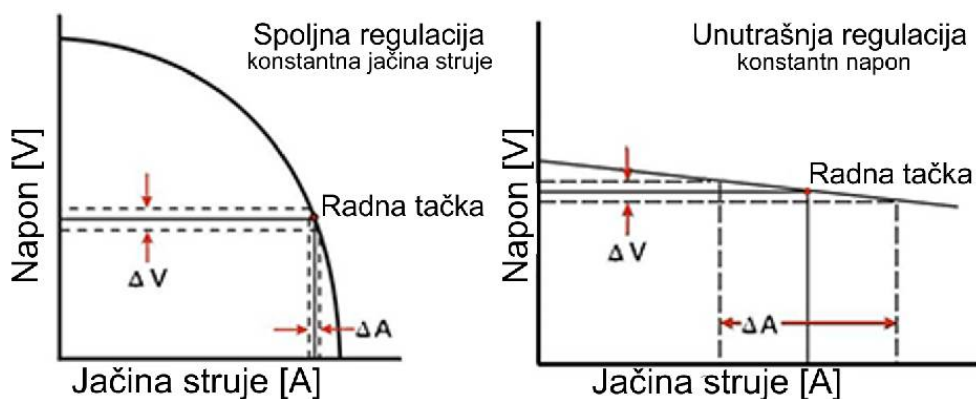
2.1.5 Izvor struje

Da bi proces bio stabilan potrebno je održavati konstantnu dužinu električnog luka odnosno brzinu dodavanja elektrode mora biti ista kao i brzina topljenja elektrode. Ovo je moguće postići uz pomoć:

1. Spoljna regulacija U – Regulacija (CC)
2. Unutrašnja regulacija I-Regulacija (CV)

Spoljna i unutrašnja regulacija povezane su sa izvorom struje za zavarivanje, odnosno one predstavljaju statičku karakteristiku izvora struje (slika 2.9). Spoljna regulacija obuhvata povećanje napona i brzine dodavanja elektrode ukoliko se povećava dužina luka, i obrnuto (slika 2.9a). Spoljna regulacija je karakteristična za REL, EPP i TIG postupak. Kod unutrašnje regulacije konstantnost dužine električnog luka se postiže

menjanjem jačine struje. Kao što se vidi sa slike 2.9b promenom jačine struje jako malo se menja napon i obrnuto malom promenom napona dolazi do velikih promena u jačini struje. Ova regulacija je pogodna za MIG, MAG procese zavarivanja [2, 13].



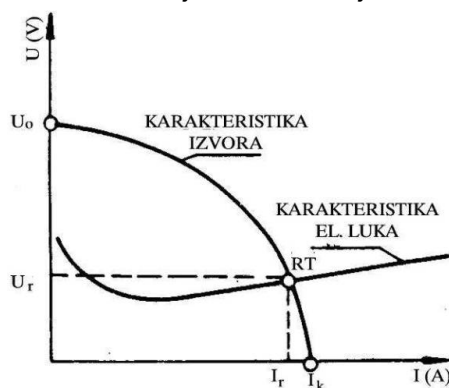
Slika 2.9 Karakteristike izvora: a) strmopadaju a, b) blagopadaju a [13]

Kombinacijom statičke karakteristike luka i statičke karakteristike izvora lako se može doći do radne tačke (RT), odnosno parametara zavarivanja za dati proces (slika 2.10). Osnovni parametri statičke karakteristike izvora struje su:

U_0 – napon praznog hoda

I_k – struja kratkog spoja (u kontaktu elektrode sa osnovnim materijalom $U=0$)

RT – Radna tačka na osnovu koje se određuje radni napon U_r i radna struja I_r

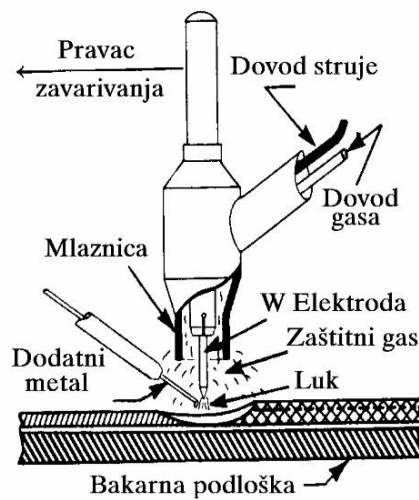


Slika 2.10 Statička karakteristika električnog luka i strmopadajuća statička karakteristika izvora struje [1]

Da bi se postigle odgovarajuće statičke karakteristike izvora struje, vrsta i jačina struje, kao i napon moraju se koristiti različiti konstrukcijski izvori struje. Za jednosmernu struju koriste se generatori i električni ispravljači, dok se za naizmeničnu koriste invertori i transformatori [2, 13].

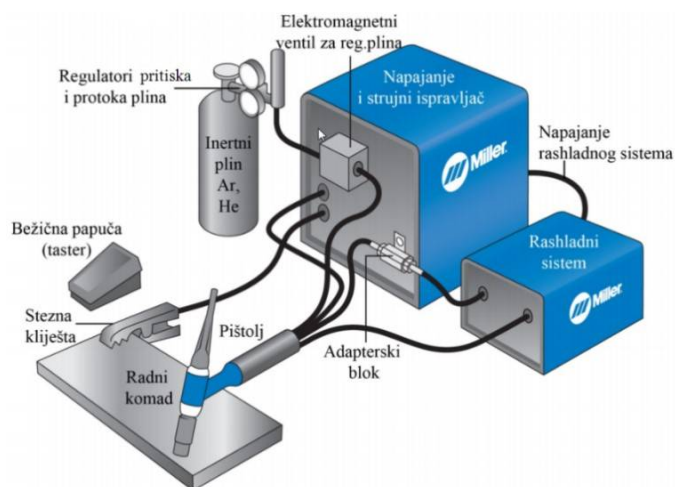
2.2 TIG

Zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštitnom gasu odnosno TIG zavarivanje, u engleskom govornom području poznato je kao GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ili u nemačkom kao WIG (Wolfram Inert Gas), predstavlja zavarivanje uz pomoć elektrode od volframa ili legure volframa u zaštitnoj atmosferi inertnih gasova. Inertni gasovi koji se koriste su argon (Ar) i helijum (He), kao i njihove mešavine, takođe i formirani gas, mešavina argona sa vodonikom (H) ili azotom (N). Sam proces zavarivanja se odvija tako što se izmeću elektrode na bazi volframa i osnovnog materijala uspostavlja električni luk koji je zaštićen strujanjem gasa. Zavarivanje se može vršiti bez upotrebe dodatnog materijala i sa upotrebom dodatnog materijala u obliku žice. Šema zavarivanja je data na slici 2.11 [14].



Slika 2.11 Šema TIG postupka [14]

Sa slike 2.11 se vidi da ukoliko se koristi dodatni materijal on se dodaje sa strane u električni luk kako bi ga električni luk istopio u zaštitnoj atmosferi. Uređaj za TIG zavarivanje se sastoji iz više elementarnih delova prikazanih na slici 2.12 [15].

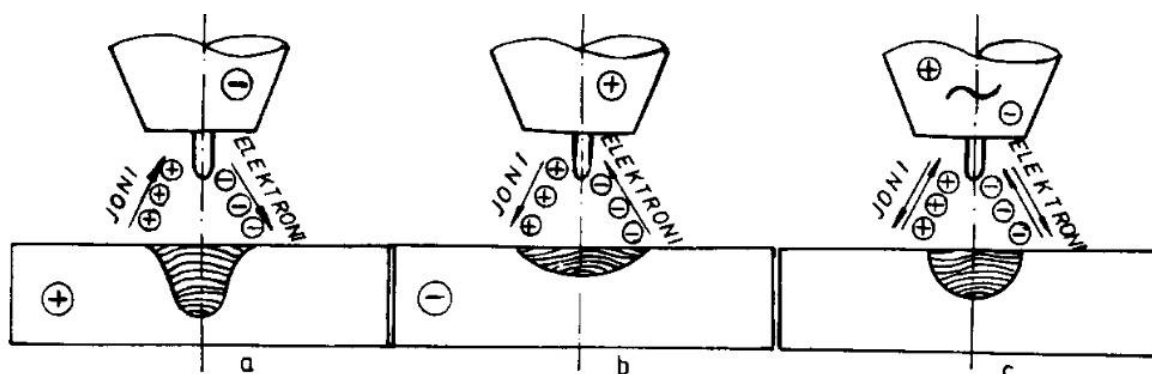


Slika 2.12 Uređaj za TIG zavarivanje [15]

U zavisnosti od jačine i mogućnosti samog uređaja za TIG zavarivanje razlikuje se i složenost sistema. Jedan od osnovnih elemenata je izvor struje za zavarivanje, u kojem sklopu se najčešće nalazi odgovarajuća elektronika sa potencimetrima i tasterima za kontrolu parametara procesa zavarivanja. Na prednjoj strani nalaze se i ekrani, voltmetri, ampermetri kako bi se mogao pratiti proces zavarivanja. Uz aparat nalazi se i boca sa zaštitnim gasom koja poseduje reducirani protok kako bi se mogao podesiti protok gasa. Kod aparata većih snaga postoji rashladni sistem na bazi vode i antifrizu. Do pištolja sa elektrodom na bazi volframa odgovarajućim provodnicima (polikablom) dovode se inertni gas, rashladno sredstvo i struja odgovarajućeg polariteta. Tako je potrebno na radni komad postaviti stezna klemena kako bi se moglo zatvoriti električno kolo [14].

2.2.1 Izvor struje

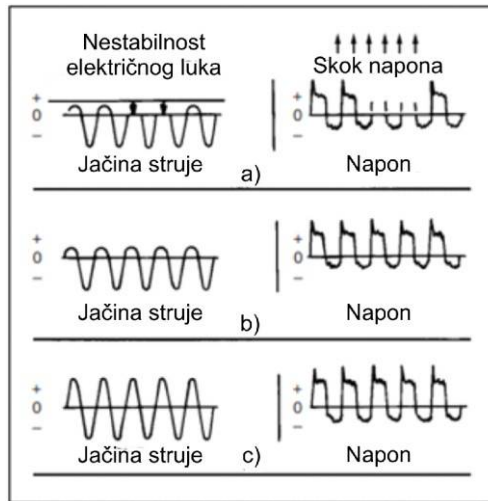
Izvor struje kod TIG zavarivanja treba da pravi strmopadajuću karakteristiku struje. Struja može biti jednosmerna i naizmennica u zavisnosti od materijala radnog komada. Jedsosmerna struja se koristi za većinu metala osim za metale sa tvrdim oksidima (Al, Mg, Ti...) za koje se koristi naizmennica struja (slika 2.13).



Slika 2.13 Uticaj vrste struje na oblik metalnog šava [12]: a) jednosmerna struja direktne polarnosti, b) jednosmerna struja indirektno polarnosti, c) naizmennica struja

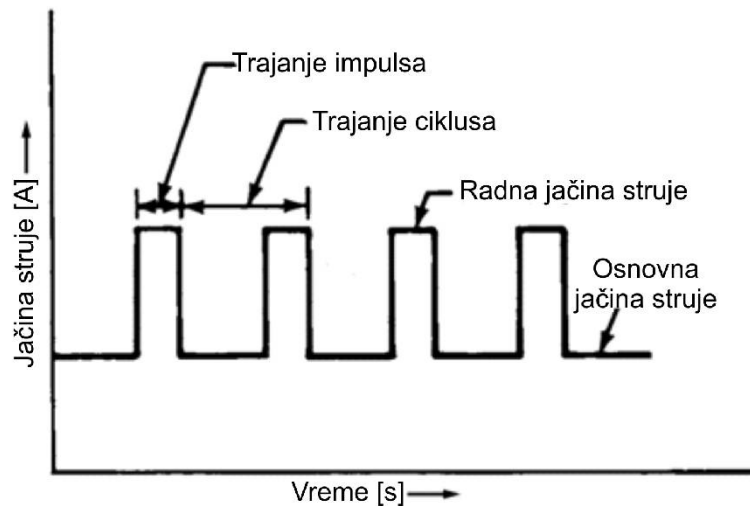
Jedsosmerna struja direktne polarnosti se najčešće upotrebljava jer je kod nje prenos toplote 70% na radni komad, a 30% na elektrodu i tako se dobija najdublji i najuži šav. Kod indirektno polarnosti prenos toplote je 70% na elektrodu a 30% na radni komad, pa je dubina uvara mala, a šav širok. Međutim kretanje elektrona od radnog komada ka elektrodi izaziva katodno isparavanje, odnosno površinsko isparavanje radnog komada i sprečava stvaranje teško topljivih oksida. Zbog malog uvara i visoke cene eksploatacije zavarivanje jednosmernom strujom indirektno polarnosti se ne koristi, već za zavarivanje Al, Mg i njihovih legura koje stvaraju teško topljive okside, koristi se naizmennica struja. Prenos toplote na elektrodu i radni komad je oko 50%, a dubina uvara i širina šava kod naizmennice struje se nalazi između direktno i indirektno jednosmerne struje. Zbog promene polariteta od 50 Hz dolazi do nestabilnosti električnog luka zbog prolaska kroz „0“, ali i do nesimetrije struje koja je posledica različitih sposobnosti Al i W u emitovanju elektrona. Nesimetrija struje izaziva nagle skokove napona što dovodi do pregrevanja izvora struje (slika 2.14a). Kako bi se izbeglo gašenje električnog luka u izvoru struje se nalazi i visokofrekventni generator napona, ali i dalje je prisutna nesimetričnost (slika 2.14b). Dodavanjem

kondenzatorskih baterija podiže se pozitivna polu perioda (slika 2.14c), a samim tim poboljšava se efekat katodnog iš enja [2, 14, 16].



Slika 2.14 Oblik periode pri zavarivanju: a) naizmeni nom strujom, b) naizmeni na struja sa VF generatorom, c) naizmeni na struja sa VF generatorom i kondenzatorskom baterijom [12]

Savremeni aparati uz režime sa jednosmernom strujom imaju mogućnost rada u pulsnom režimu. Pulsni režim rada predstavlja rad sa jednosmernom strujom gde se jačina struje nalazi u odgovarajućem rasponu koji se ponavlja u određenim intervalima kao što je prikazano na slici 2.15. Postoji mogućnost regulisanja vremenskog trajanja perioda sa velikom radnom i malom osnovnom jačinom struje. Prednost pulsa u odnosu na konstantnu jačinu struje je u smanjenom unosu toplote. Pulsni režim se češće koristi kod automatizovanih procesa nego u ručnom zavarivanju [14, 17].

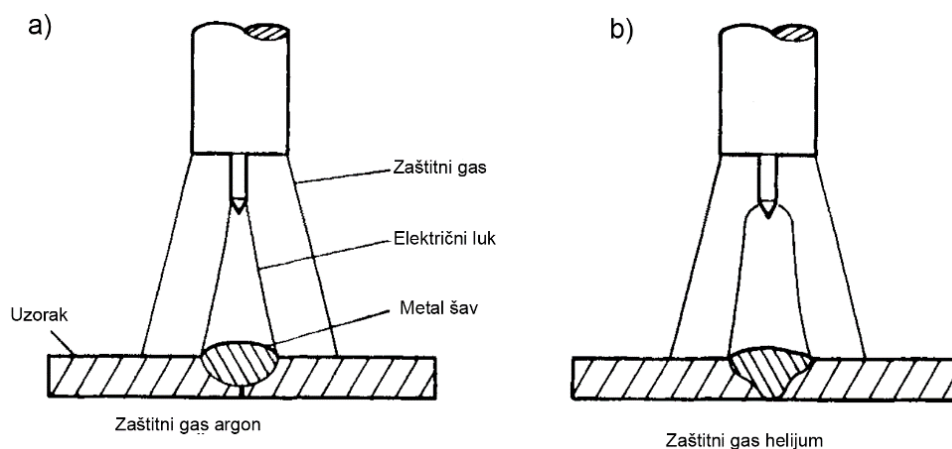


Slika 2.15 Kvadratni oblik periode pri pulsnom zavarivanju [14]

2.2.2 Zaštitni gas

Sa izvorom struje odnosno aparatom povezana je boca sa zaštitnim inertnim gasom. Kao zaštitni gas koriste se inertni gasovi kao što su argon, helijum, njihove mešavine i mešavine argona sa vodonikom i azotom [18].

Argon ima ve u upotrebu o odnosu na helijum. isto a argona koji se upotrebljava je ve a od 99.99%. Ovakav argon ima veliku gustinu pa pada dole, odnosno potiskuje kiseonik gore. Neke od prednosti upotrebe argona su stabilniji elektri ni luk uz minimalne promene napona pri promeni dužine elektri nog luka, efikasnije kataliti ko iš enje, dobra zaštita elektri nog luka i sa manjim protokom gasa 7 do 16 l/min, kao i postojanost zaštite pri manjem strujanju vazduha, niža cena i ve a isplativost. Nedostatak u upotrebi zašitnog gasa argona je manja penetracija u odnosu na helijum (slika 2.16). Koriš enjem helijuma najmanje isto e 99,996% kao zašitnog gasa postiže se ve a toplotna mo , samim tim i ve a dubina uvara. Nedostatak helijuma je njegova gustina koja je manja od vazduha i helijum odlazi na gore, stoga je potreban ve i protok 14-24 l/min, samim tim i ve a potrošnja kako bi se elektri ni luk zaštitio [14]. Pored istih gasova upotrebu imaju i mešavine gasova. Ve a penetracija kod zaštite argonom se postiže tako što se argonu dodaje vodonik do 5%, ali i mešanjem argona sa helijumom [7, 18, 19]. Zaštita argonom se može koristiti kod svih metala, dok He, i mešavine gasova se koriste kod zavarivanja obojenih metala i njihovih legura (tabela 2.2).

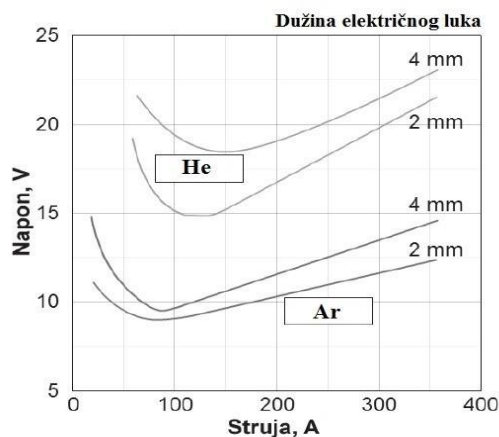


Slika 2.16 Izgled elektri nog luka i dubine uvara u zavisnosti od zašitnog gasa [16]

Tabela 2.2 Zašitni gasovi i njihova primena prema EN 439:1994

Gas	Nelegirani ili niskolegirani elici	Ner aju i elici	Al	Cu	Ni	Obojeni metali osetljivi na gasove
Ar						
Ar + H ₂						
He						
75% Ar-25% He						
50% Ar – 50% He						

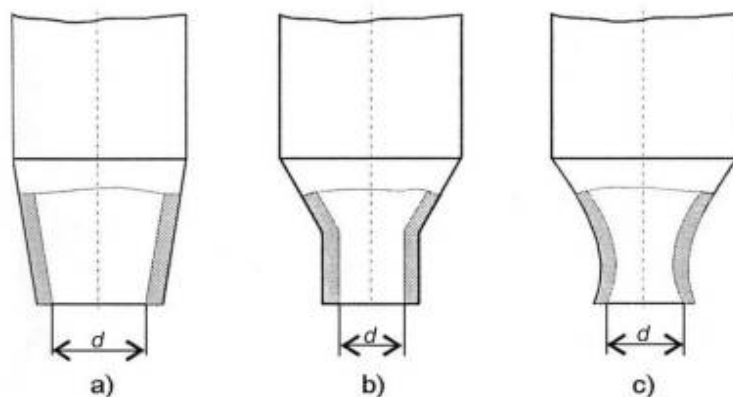
Na slici 2.17 se vidi koliko je napon ve i pri upotrebi helijuma u odnosu na argon pri istim dužinama elektri nog luka.



Slika 2.17 Napon luka i ja ina struje u zavisnosti od zaštitnog gasa [14]

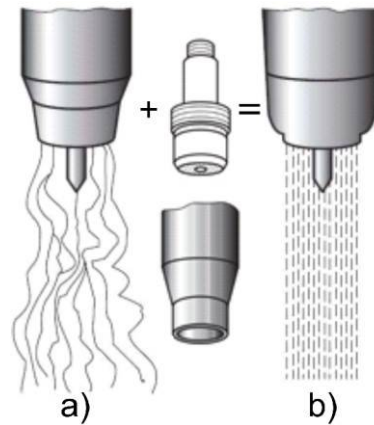
2.2.3 Mlaznica

Pored izbora gasa bitno je adekvatno odrediti protok gasa kao i adekvatnu mlaznicu. Mlaznica predstavlja kerami ki deo koji se postavlja na kraj zavariva kog pištolja oko netopljiva elektrode, i služi da usmerava i spre i rasipanje zaštitnog gasa. Odabir mlaznice se vrši na osnovu zaštitnog gasa, debljine elektrode na bazi volframa i ja ine struje. Postoje mlaznice konusnog, cilindri nog i profilisanog oblika (slika 2.18) [1, 16].



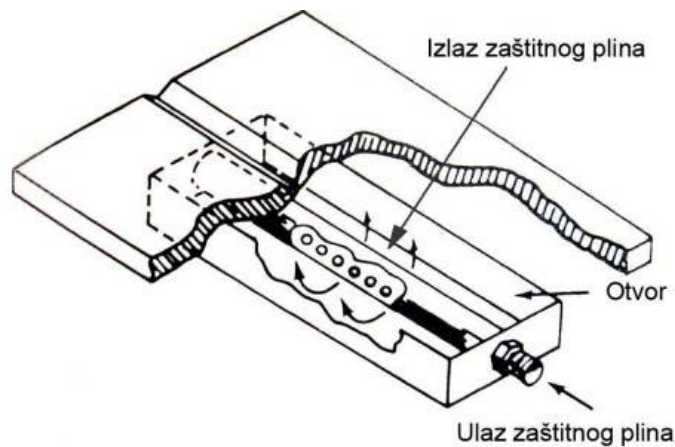
Slika 2.18 Vrste mlaznica za zaštitni gas [2]: a) konusni oblik, b) cilindri ni oblik c) profilni oblik

Najbolja zaštita se postiže mlaznicom profilisanog oblika. Da bi se poboljšala usmerenost unutar mlaznice oko elektrode se postavlja sito koje ravnomerno raspore uje gas po celom pre niku mlaznice (slika 2.19) [14].



Slika 2.19 Strujanje zaštitnog gasa [20]: a) pre postavljanja sita, b) posle postavljanja sita

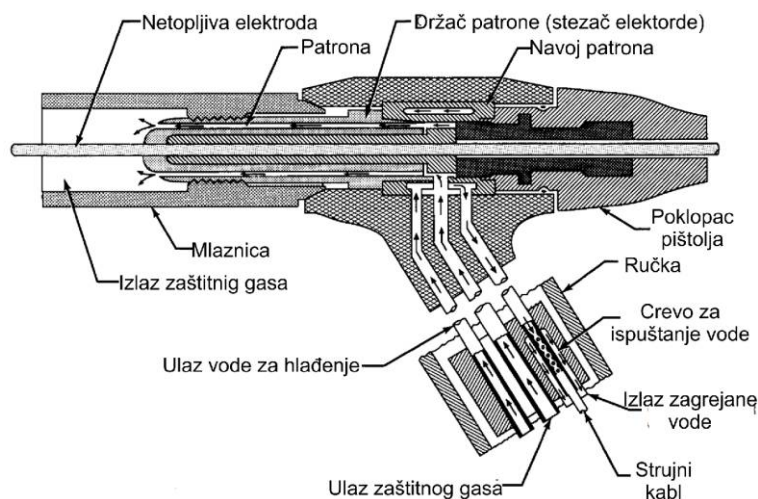
Kod TIG zavarivanja bitno je i drugu stranu metala šava zaštititi inertnim gasom kako bi se eliminisao uticaj atmosfere. Za takve potrebe postoje posebni pribori, podložne ploče, koje se postavljaju sa druge strane spoja, jedan od njih je prikazan na slici 2.20.



Slika 2.20 Podložna ploča sa zaštitnim inertnim gasom [12, 14]

2.2.4 Pištolj za zavarivanje

Od izvora struje do radnog mesta idu provodnici od kojih je jedan sa steznim kleštima koja se priključuju za radni komad, dok su ostali provodnici spakovani u jedan kabl koji se naziva polikabl i na njegovom kraju je zavarivački pištolj (gorionik). Unutar polikabla nalazi se provodnik električne struje, crevo za dotok zaštitnog gasa, i creva za dotok fluida za hlađenje, ali i odvod zagrejanog fluida (slika 2.21).



Slika 2.21 Poprečni presek zavarivačkog pištolja kod TIG postupka [14]

2.2.5 Elektroda

Za uspostavljanje i održavanje električnog luka najveću ulogu ima netopljiva elektroda na bazi volframa. Ona nastaje sinterovanjem volframa i čisto je 99,5% ili više čisto, jer ne ulazi u trošenje elektrode. Oznaka elektrode je WP. Tako topljenje volframa je 3410°C , tako da se elektroda ipak troši, ali u oblasti koja nema adekvatno hlađenje tj. samo vrh elektrode. Do topljenja vrha elektrode dolazi pri zavarivanju velikom gustinom struje i pri jednosmernoj struji obrnute polarnosti. Elektroda se najčešće upotrebljava za naizmeničnu struju, jer kod jednosmerne je teška uspostava električnog luka. Topljenje elektrode predstavlja problem jer rastopljena elektroda dospeva u metalni šav i kontaminira šav. Kako bi se povećao radni vek elektrode, ali i stabilnost luka volfram se legira sa torijumom, cirkonijumom, cerijumom i lantanom, a poželjno je da se koristi produžen protok zaštitnog gasa kako bi se elektroda ohladila i sprečila oksidacija.

- Elektrode na bazi volframa se legiraju sa 1-4% torijum oksida (ThO_2) koji pomaže u lakšem emitovanju elektrona, olakšava uspostavljanje električnog luka, povećava stabilnost luka i povećava vek trajanja. Tako izdržava do 20% veće gustine struje i nema kontaminacije šava kao kod čistih volfram elektroda. Najčešće u upotrebi je elektroda W-Th2 što predstavlja leguru volframa sa 2% torijum oksida. Torijum spada u radioaktivne materijale stoga se njegova upotreba smanjuje, a samim tim i upotreba ovakvih elektroda.
- Elektrode na bazi volframa legirane sa 0,2-1% cirkonijum oksida (ZrO_2) se koriste kod naizmenične struje. Po osobinama se nalaze između elektrode od čistog volframa i legirane sa ThO_2 . Prednost u odnosu na nelegirane elektrode je što ne dovodi do kontaminacije šava i lakša uspostava električnog luka. Nedostatak je što se elektroda lako zatupa.
- Elektrode na bazi volframa legirane sa 2% cerijum oksida (CeO_2) proizvedene su kao moguća zamena za W-Th, jer nisu radioaktivne. U poređenju sa elektrodom od čistog volframa ima bolju uspostavu luka, stabilniji luk i manje trošenje.

- Elektrode na bazi volfram legirane sa 1-2% lantan oksida (La_2O_3) nastale su kao zamena za elektrode legirane Th, jer La nije radioaktivan. Ova elektroda sa 2% La ima najpribližnije osobine elektrodi W-Th2 uz manje trošenje vrha.

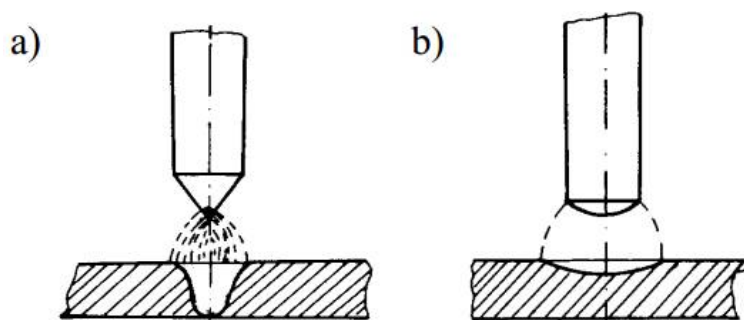
Kako bi se lakše razlikovale elektrode su na jednom kraju obojene. To je propisano i standardom ISO 6848:2004 i AWS5.12:2009 (tabela 2.3).

Tabela 2.3 Označavanje TIG elektroda po standardu ISO 6848:2004

Oznaka	WP	WCe 20	WLa 10	WLa 15	WLa 20	WTh 10	WTh 20
Oksidi legiraju ih elemenata	Nema	CeO_2	La_2O_3	La_2O_3	La_2O_3	ThO_2	ThO_2
Maseni udeo legiraju ih oksida [%]		1,8-2,2	0,8-1,2	1,3-1,7	1,8-2,2	0,8-1,2	1,7-2,2
Boja	Zelena	Siva	Crna	Zlatna	Plava	Žuta	Crvena

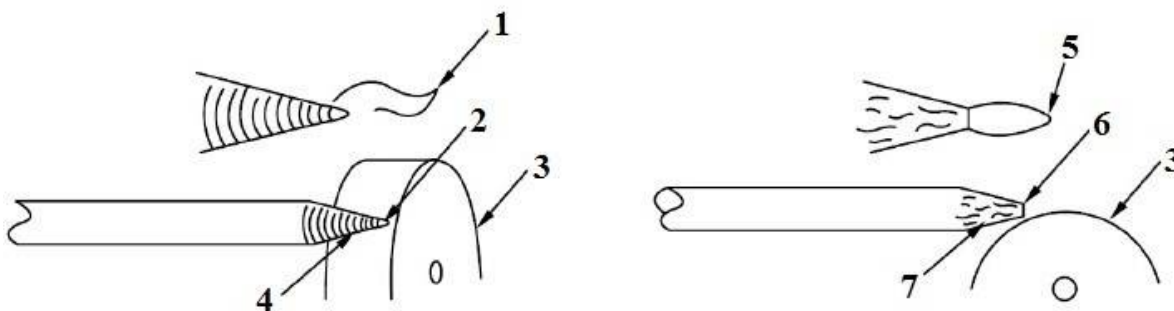
2.2.6 Oblik vrha elektrode

Jačina struje, vrsta struje i polaritet, kao i vrsta elektrode utiču na temperaturu koja je na vrhu elektrode, a samim tim i na trošenje vrha elektrode, odnosno zatupljivanje elektrode [21]. Stoga je potrebno vršiti oštrenje elektrode kako bi se napravio vrh odgovarajućeg ugla. U zavisnosti od materijala koji se zavaruje i potrebne jačine struje određuje se oblik i potreban ugao elektrode. Oblik vrha elektrode može biti koničan i zaobljen tj. sa polukružnim vrhom (slika 2.22). Kod konične elektrode gustina struje je veća i koncentrisanija pa se postižu veće dubine penetracije pri zavarivanju. Najčešće se koristi za jednosmerne struje. Elektroda sa zaobljenim vrhom ima malu dubinu uvaru i koristi se pri zavarivanju naizmeničnom strujom Al, Mg i njihovih legura [12].



Slika 2.22 Uticaj oblika elektrode na oblik šava [12]: a) konusni, b) sferni

Ugao vrha kod koničnih elektroda se postiže brušenjem. Pri brušenju bitno je pravilno postaviti elektrodu u odnosu na odgovarajući brusni kamen. Elektrode tanje od 2,5 mm potrebno je da imaju konus visine oko 2 prenika, dok deblje elektrode treba da imaju visinu konusa oko 1,5 prenika. Ova zavisnost utiče na ugao na vrhu konusa. Na slici 2.23 prikazan je pravilan i nepravilan način brušenja elektrode.

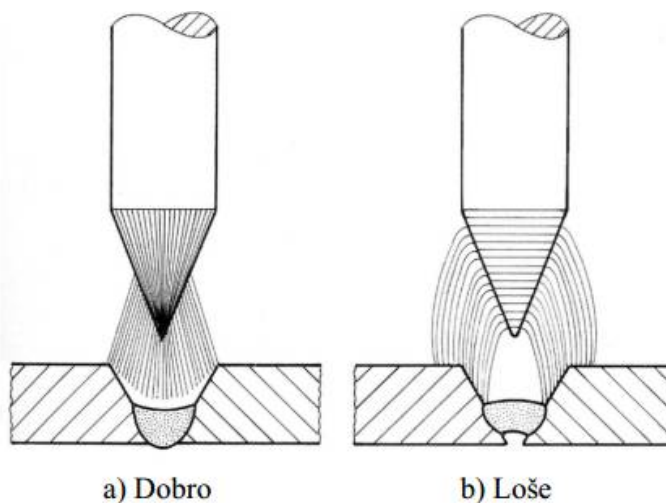


- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1) "Lutaju i luk" | 5) Stabilni luk |
| 2) Vrh brusa u obliku tačke | 6) Ravni vrh |
| 3) Brusni kamen | 7) Aksijalni smer dobijen brušenjem |
| 4) Radijalni smer dobijen brušenjem | |

Slika 2.23 Priprema elektrode na bazi legure volframa [20]

Da bi se povećala trajnost elektrode njen vrh se zatupljuje do 0,5 mm što neznatno utiče na dubinu uvara.

Ukoliko se elektroda brusi poprečno (radijalno) na osu, tragovi brušenja izazivaju da električni luk nije skoncentrisan (slika 2.24b) za razliku od brušenja u pravcu ose (slika 2.24a).



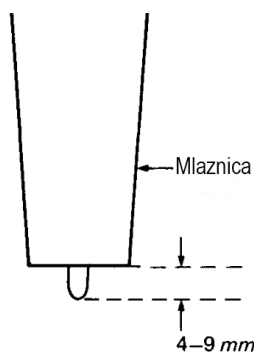
Slika 2.24 Oblik električnog luka nakon brušenja elektrode [20]

Kako je sam proces oštrenja komplikovan preporuka je koristiti uređaje namenjene za oštrenje elektroda na bazi volframa [22]. Posebno što ti uređaji imaju adekvatnu komoru koja sakuplja opiljke od brušenja koji su štetni po ovek.

Vrednost ugla kod koničnih elektroda, i zaobljenja kod sfernih zavisi od prenika elektrode odnosno od jačine struje sa kojom se treba zavarivati. Kod jednosmerne struje jačine do 25 A koristi se ugao vrha elektrode 30°, od 25-100 A ugao vrha elektrode od 30-60° uz mogućnost zatupljenja vrha, od 100-200 A ugao vrha elektrode 60 - 90° sa zatupljenim vrhom. Elektrode za naizmeničnu struju manje jačine mogu biti

konusnog oblika, sa zaobljenjem na vrhu. Elektroda sa sferom koristi se za jašine struje oko 150 A [23].

Elektroda se postavlja u pištolj tako da ima prepust od 4 do 9 mm kako bi se obezbedio adekvatan protok gasa i površina pokrivena gasom (slika 2.25). Tako e sa ovim rastojanjem smanjuje se zagrevanje mlaznice i eliminiše se mogućnost kontaminacije spoja usled raspadanja mlaznice.



Slika 2.25 Rastojanje vrha elektrode od mlaznice [23]

2.2.7 Dodatni materijal

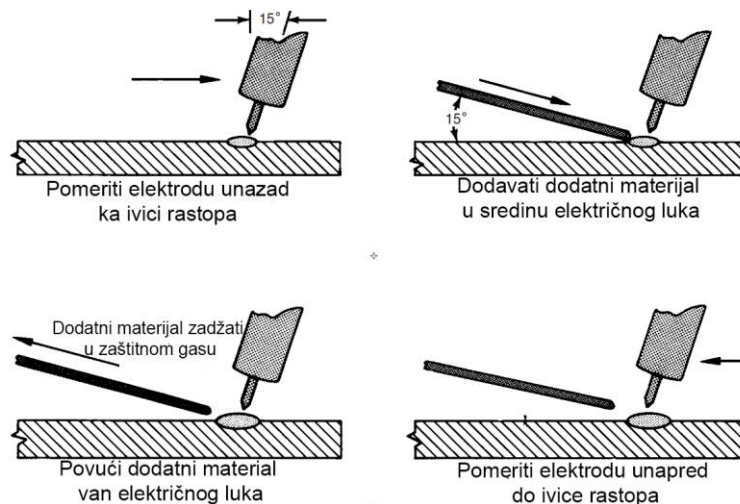
Zavarivanje materijala tanjih od 1 mm naj eš e se radi bez dodatnog materijala samo rastapanjem osnovnog materijala. Za deblje materijale koristi se dodatni materijal u obliku žice pre nika 0,8-4 mm dužine 1000 mm, ili žice u kolutu kod aparata opremljenih posebnim dodava em. Odabir dodatnog materijala zavisi od vrste i debljine osnovnog materijala, pre nika elektrode i vrste spoja koji je potrebno zavariti [16]. U tabeli 2.3 prikazani su preporu eni parametri za zavarivanje visokolegiranih elika u zavisnosti od debljine radnog materijala

Za dodatni materijal preporu ljiivo je da po hemijskom sastavu i mehankim osobinama bude približan osnovnom materijalu. S obzirom da se TIG metodom mogu zavarivati raznorodni materijali, dodatni materijal može da bude približan jednom osnovnom materijalu, ali može biti i potpuno razli it. Odabir hemijskog sastava dodatnog materijala je potrebno izvršiti po katalogu proizvo a a ukoliko je potrebno da se zavaruju raznorodni materijali [14].

U zavisnosti od na ina dodavanja dodatnog materijala u elektri ni luk pri zavarivanju postoje tri vrste TIG zavarivanja:

- Ru no
- Poluautomatizovano
- Automatizovano TIG zavarivanje

Ru no TIG zavarivanje se zasniva da zavariva u jednoj ruci drži pištolj za zavarivanje dok drugom rukom dodaje dodatni materijal (slika 2.26). Zavariva ima potpunu kontrolu nad zavarivanjem stoga je potrebno veliko iskustvo kako bi zavareni spoj bio odgovaraju eg kvaliteta.



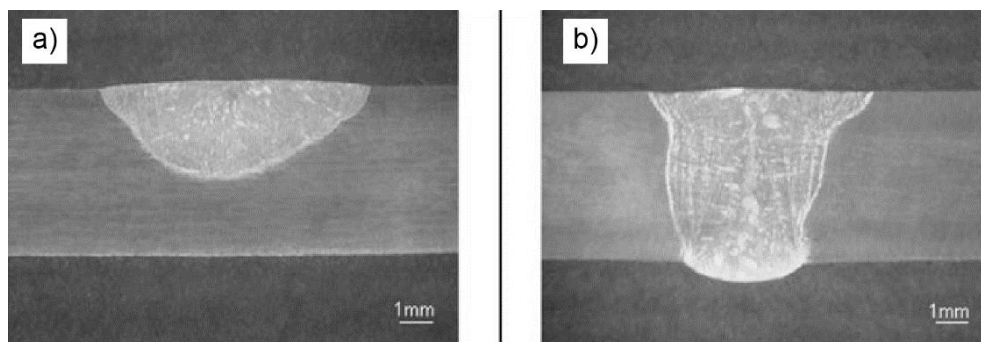
Slika 2.26 Tehnika ru nog zavarivanja [14]

Poluautomatizovano zavarivanje se izvodi na sličan način kao ručno zavarivanje s tim što se dodatni materijal dodaje automatski. Postoji više izvedbi, ali najčešće se koristi modifikovan zavarivački pištolj gde dodatni materijal dolazi kroz poseban buržir. Prekidac je u obliku nožne papuice, čijim pritiskom se aktivira motor koji dodaje žicu.

Automatsko zavarivanje se izvodi na CNC programiranim robotima, čime je omogućeno zavarivanje bez uticaja ljudskog faktora. Na ovaj način povećava se efikasnost zavarenog spoja i produktivnost procesa zavarivanja. Elektronika koja upravlja robotom pored kretanja prati i optimizuje parametre zavarivanja. Međutim, robot nikada nije isključen iz procesa, jer istog robota treba programirati i odrediti početne parametre za zavarivanje, kao i dodatni materijal.

2.3 A-TIG

U poslednje vreme, TIG postupak je sve aktuelniji jer omogućava dobijanje kvalitetnih zavarenih spojeva sa dobrim estetskim izgledom. Najviše u upotrebu ima pri zavarivanju neravnih elika malih debljina i izradi korenog prolaza kod većih debljina materijala. Međutim pored mnogih prednosti, nedostatak TIG-a je mala brzina zavarivanja i veliki uticaj ovekca. Stoga se danas razvijaju i primenjuju razne modifikacije TIG postupka kako bi se ti nedostaci odstranili [3]. Jedan od tih procesa je upotreba aktivnog premaza. Taj postupak se zove A-TIG (Active Flux TIG). Upotreba premaza omogućava veću penetraciju čime je moguće zavarivati materijale većih debljina u jednom prolazu (slika 2.27), i zavarivanje bez pripreme materijala, odnosno izrade žljebova. Na ovaj način smanjuje se broj prolaza, skraćuje vreme pripreme i ukupno vreme zavarivanja što sve doprinosi velikoj ekonomskoj isplativosti A-TIG postupaka [3].

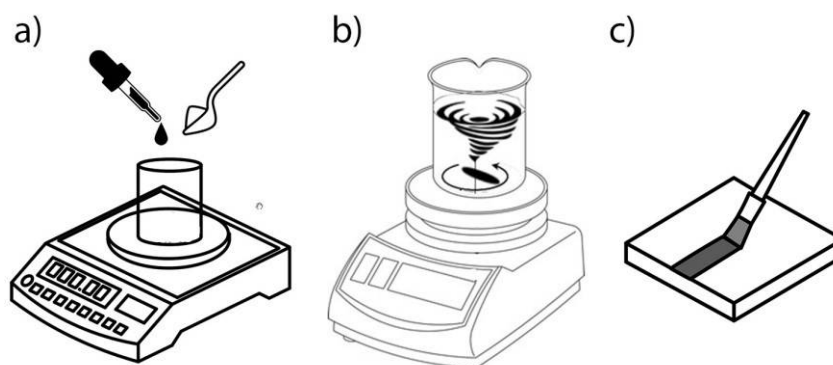


Slika 2.27 Izgled metala šava [7]: a) uzorak bez premaza (TIG), b) uzorak sa premazom (A-TIG)

A-TIG postupak je nastao 1960-ih godina na institutu Paton u Ukrajini, gde je razvijen premaz koji je omogućio povećanje dubine uvara pri zavarivanju nerazličitelika i legura Ti [24]. U početku primenjivao se u vojnoj i avio proizvodnji, međutim i pored velikih prednosti i doprinosa nije široko zastupljen u masovnoj upotrebi.

2.3.1 Aktivni premaz

Priprema premaza započinje odabirom estica aktivnih elemenata, oksida, fluorida ili hlorida, kao i njihovih mešavina. Estice u prstvom stanju se usitnjavaju kako bi dobili estice određene granulacije. Nakon toga se vrši odmeravanje udela estica i rastvarača (najčešće etanol ili aceton). Potom se mešanjem homogenizuju estice sa rastvaračem i dobija suspenzija koja se etkicom ili naprskavanjem nanosi na materijal, nakon čega se vrši zavarivanje netopljivom elektrodom na bazi volframa. Ceo postupak pripreme je prikazan na slici 2.28.



Slika 2.28 Priprema aktivnog premaza: a) odmeravanje komponenti aktivnog premaza, b) mešanje komponenti aktivnog premaza c) nanošenje aktivnog premaza

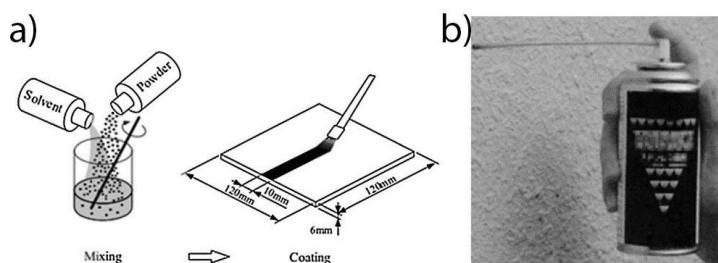
Premaz utiče na promenu geometrije šava, odnosno povećanje dubine uvara i smanjenje širine šava. Dubina uvara kod upotrebe premaza se povećava do četiri puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak sa istim parametrima [25]. Aktivni premazi su postali veoma značajni i mnogi istraživači ih primenjuju na raznim materijalima.

Pošto je ustanovljeno da aktivni premaz ima uticaj na proces zavarivanja, istraživači su pokušali da daju pouzdano objašnjenje za veću dubinu uvara kod legura titanijuma i elika [8, 9, 26–28], jer su sile koje deluju pri zavarivanju kao što su: gravitaciona (sila pritiska), elektromagnetna, površinski naponi i aerodinamički otpor iste kod TIG i A-

TIG postupka. Me utim Mills sa saradnicima [31] ustanovio je da premaz ima slabije dejstvo kod procesa zavarivanja topljenjem bez elektri nog luka (laser i elektronski snop). Nakon detaljnih istraživanja o delovanju sila u zoni elektri nog luka ustanovljeno je da se dubina uvara menja sa promenom smera kretanja rastopa. Promena smera se vezuje za Marangonijev efekat strujanja fluida, što je prihva eno kao objašnjenje za delovanje aktivnog premaza [29–31].

2.3.2 Metode nanošenja aktivnog premaza

Topitelj ili aktivni premaz nastaje mešanjem mikro ili nano estica sa acetonom ili etanolom dok ne poprimi oblik suspenzije ili paste koja se nanosi na površinu metala koji treba zavarivati. Premaz se može naneti pomo u etkice ili kao sprej iz boce pod pritiskom u zavisnosti od gustine aktivnog premaza (slika 2.29) [4, 32]. Nanošenje etkicom je eš i postupak, jer je pre upotrebe mogu e pomešati komponente sa rastvara em u preporu enom odnosu.



Slika 2.29 Tehnike nanošenja aktivnog premaza [4]: a) etkicom b) sprejom

2.3.3 Marangonijev efekat

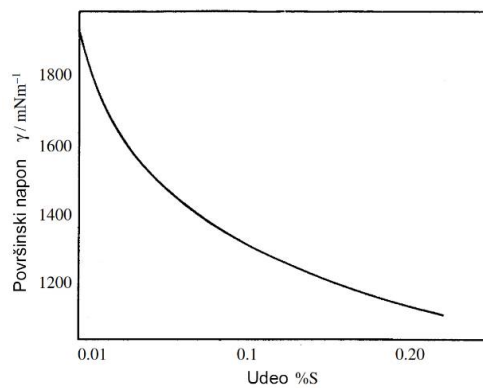
Marangonijev efekat je nazvan po Karlu Marangoniju koji ga je detaljno istraživao 1865. g , me utim efekat je prvi uo io James Thomson 1855. godine. [33]. Marangonijev efekat predstavlja efekat strujanja fluida, odnosno poznat je kao toplotni koeficijent površinskog napona koji ima zna ajan uticaj na dubinu uvara u materijalu. Po ovom efektu pravac kretanja fluida zavisi od toplotnog koeficijenta površinskog napona u fluidu. Fluid se kre e od polja niskog površinskog napona ka polju višeg površinskog napona. Napon termo kapilarnog protoka odre en je Marangonijevim brojem **Ma**, koji je bezdimenziona veli ina i prikazana je formulom (1):

$$Ma = \frac{\rho \cdot g \cdot L^2}{\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dT} \quad (1)$$

gde su: $d\sigma/dT$ - toplotni koeficijent površinskog napona, dT/dx - temperaturni koeficijent, ρ - viskozitet, a - temperaturna difuzija i L - karakteristi na dužina [31].

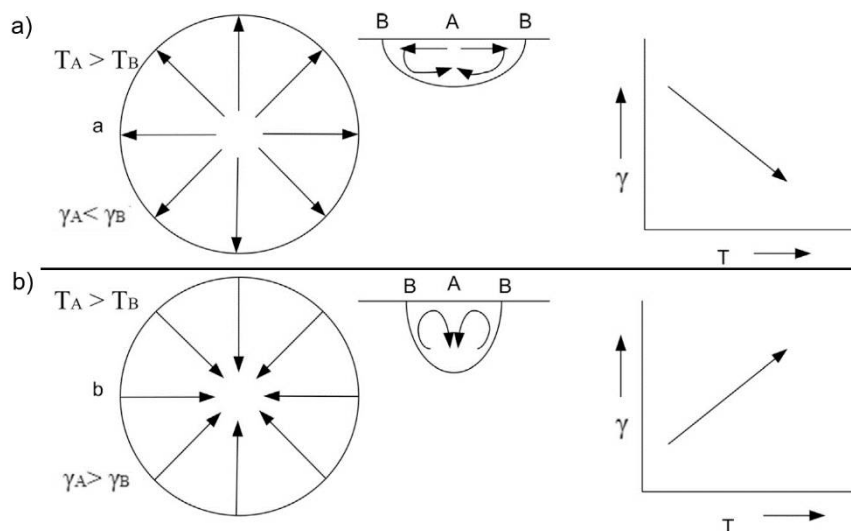
Marangonijev efekat se prvi put u zavarivanju spominje 1960. kao mogu e rešenje problema pri zavarivanju - odlivak za odlivak. Problem se javio pri robotskom zavarivanju velikog broja spojeva u više prolaza i uo ena je promena u penetraciji pri

TIG zavarivanju neraju ih austenitnih i feritnih elika. Sa istim parametrima određeni spojevi su bili potpuno provareni, dok su neki bili samo delimično. Urađeni su brojni pokušaji da se uspostavi zavisnost između promenljive dubine uvara kod zavarivanja - odlivak za odlivak, ali i pri zavarivanju sa manjim količinama neistotipičnih metala u materijalu. Uočeno je da manje količine neistotipičnih ili određeni elementi mogu imati veliki uticaj na električni luk i površinske osobine metala šava [31]. Takođe je uočeno da promena toplotnog koeficijenta površinskog napona ($d\gamma/dT$) na metalu šava utiče na kretanje rastopa u metalnoj kupki. Površinsko prisustvo aktivnih elemenata sumpora i kiseonika u eliku izaziva promene površinskog napona (γ) u metalnoj kupki (slika 2.30), dok promena toplotnog koeficijenta površinskog napona ($d\gamma/dT$) u metalnoj kupki povećava površinski napon u središtu metala šava koji se postepeno smanjuje prema spoljašnjem delu rastopa [4, 31].



Slika 2.30 Uticaj udela sumpora na površinski napon [31]

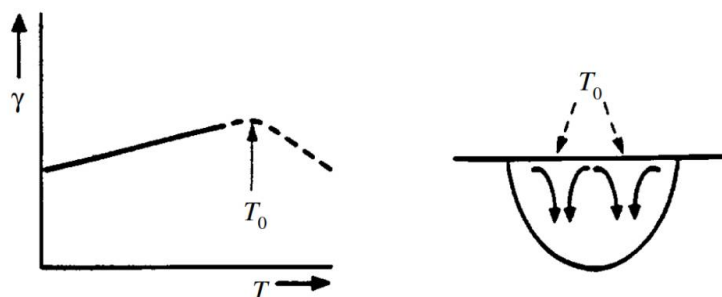
Na osnovu uticaja količine aktivnih elemenata na zavaren spoj, odnosno na kretanje tečnog metala u kupki, razvila se teorija da pravaci i veličina termo kapilarnih sila utiču na pravac kretanja rastopa u metalnoj kupki, te da se termo kapilarne sile mogu kontrolisati koncentracijom površinskih aktivnih elemenata kao što su sumpor i kiseonik. Međutim uočeno je da kada koncentracija površinskih aktivnih elemenata pređe određenu vrednost, toplotni koeficijent površinskih napona ($d\gamma/dT$) prelazi iz negativne u pozitivnu vrednost. Na slici 2.31a prikazano je kretanje rastopa kod elika sa niskim sadržajem sumpora i kiseonika gde se rastop kreće prema granici rastopa tj. iz oblasti nižeg površinskog napona ka oblasti sa višim površinskim naponom. Uočljivo je da povećanje temperature dovodi do negativnog toplotnog koeficijenta površinskog napona ($d\gamma/dT$). Rezultat ovakvog kretanja je plitak uvar i velika širina šava [4, 34].



Slika 2.31 Kretanje rastopa [4]: a) negativna vrednost površinskog napona, b) pozitivna vrednost površinskog napona

Ukoliko na površini elika, ili u samom eliku ima povećan sadržaj odgovarajućih elemenata u metalnoj kupki dolazi do promena koeficijenta površinskog napona (slika 2.31b).

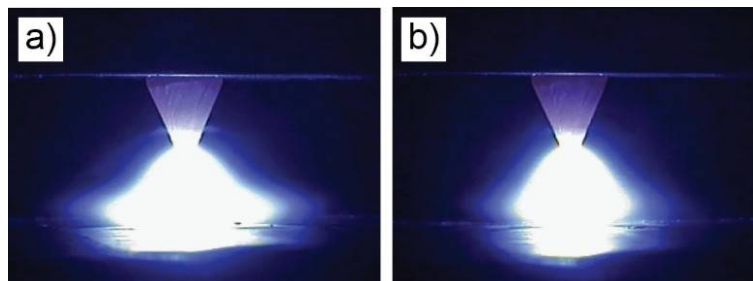
Toplotni koeficijent površinskih napona raste do određene temperature. Nakon dostizanja maksimalne vrednosti, sa daljim porastom temperature on opada, odnosno iz pozitivne prelazi u negativnu vrednost. U radovima [8, 32, 35] ovaj efekat je opisan kao obrnuti Marangonijev efekat. Obrnuti Marangonijev efekat izaziva da se rastop kreće od granice rastopa prema centru metala šava. Kombinacija kretanja rastopa i pritiska električnog luka usmeravaju rastop da se kreće ka dole kako je prikazano na slici 2.31b. Kombinacija ovih sila dovodi do povećanja penetracije, jer toplotu sa vrha prenosi ka korenu metala šava. Ovakvo ponašanje postoji samo do određene granice temperature nakon koje dolazi do složenog kretanja rastopa. Ustanovljeno je da sa porastom temperature raste i koeficijent površinskog napona, ali do neke temperature. Nakon postizanja maksimalne vrednosti koeficijenta površinskog napona sa daljim porastom temperature koeficijent menja vrednost iz pozitivne u negativnu (slika 2.32) [31, 34].



Slika 2.32 Promena smera koeficijenta površinskog napona [31]

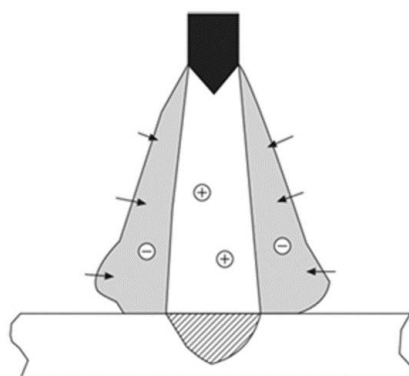
2.3.4 Zavariva ki luk

Pri TIG zavarivanju kada pištolj sa elektrodom na bazi volframa prelazi sa elika na elik premazan sa aktivnim premazom uo ljiivo je smanjenje pre nika elektri nog luka (slika 2.33). Ova pojava je opisana kao suženje elektri nog luka pri A-TIG zavarivanju.



Slika 2.33 Izgled elektri nog luka [36]: a) bez premaza, b) sa aktivnim premazom (TiO_2)

Suženje elektri nog luka sužava površinu korena elektri nog luka, odnosno anodne mrlje i dovodi do pove anja gustine struje, što rezultira užim šavom sa ve om dubinom uvara u odnosu na klasi an TIG postupak. Tokom A-TIG zavarivanja plava svetlost elektri nog luka je sužena, a oko njega su isparenja aktivnog premaza koja ga sužavaju (slika 2.34) [32, 37].



Slika 2.34 Šematski prikaz konstrukcije elektri nog luka [4]

U zavisnosti od vrste aktivnog premaza zavisi i suženje elektri nog luka. Ura eni su brojni eksperimenti kako bi se utvrdio uticaj razli itih elemenata, a u jednom od njih upore ivan je uticaj premaza na bazi TiO_2 i SiO_2 [36]. Ustanovljeno je da ve e suženje luka dobijeno upotrebom SiO_2 , a to je objašnjeno elektro negativnoš u premaza. Si ima ve u elektro negativnost u odnosu na Ti, samim tim pri isparenju može da primi više elektrona koji deluju na obimu elektri nog luka i ini luk užim [36]. Na osnovu rezultata istraživanja o uticaju aktivnih premaza verovalo se da elementi sa velikom elektro negativnoš u, halidi (elementi VII kolone) imaju veliki uticaj na oblik elektri nog luka. Me utim, ispostavilo se da je nemogu e ustanoviti kvalitetnu korelaciju izme u jonizacije elektri nog luka i njegovog suženja. Isparenja halida pored elektrona iz elektri nog luka prikupljali su i druge elemente npr. fluoride koji izazivaju širenje elektri nog luka [38].

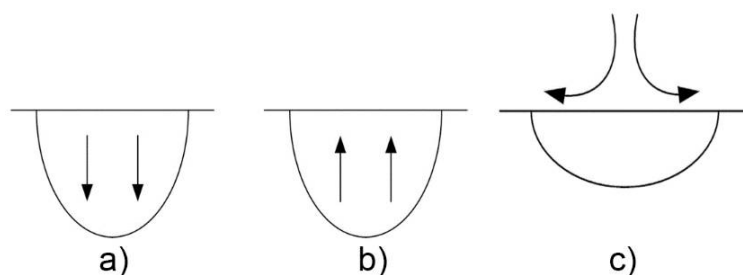
2.3.5 Faktori koji uti u na performanse kod A-TIG postupka

Na dubinu uvara kod A-TIG postupka veliki uticaj imaju [39]:

- Marangonijeve sile, odnosno sile površinskih napona,
- Elektromagnetna sila, odnosno Lorencova sila,
- Sila gravitacije, odnosno sile hidrostati kog potiska,
- Sile aerodinami kog otpora.

Zbog uticaja Marangonijevih sila rastop se kre e od centra prema spolja i tako prenosi maksimalnu toplotu do bo nih granica rastopa. Ovakvim kretanjem se dobija širok metal šav sa malom dubinom uvara (slika 2.31a) [4].

Lorencove sile nastaju usled elektromagnetnog polja koje se stvara oko elektrode i elektri nog luka u kome se kre u naelektrisane estice. Zbog dejstva Lorencove sile rastop se kre e u smeru strujnog toka, odnosno ka korenu metala šava (slika 2.35a) [30].



Slika 2.35 Kretanje rastopa usled: a) elektromagnetnih sila, b) sile potiska, c) aerodinami kih sila

Sila gravitacije ima stalni uticaj, me utim u rastopu se javlja razlika u gustini metala. Gustina metala se smanjuje sa porastom temperature stoga te ni metal u rastopu kre e se od ve e gustine ka manjoj, odnosno ka površini šava kako je prikazano na slici 2.35b. Ova sila uti e na smanjenje dubine uvara, me utim njen uticaj u pore enju sa drugim silama je manji [4, 30].

Sile aerodinami nom otporu koje nastaju pri prelasku elektri nog luka preko površine metala i metalne kupke izazivaju kretanje po spoljašnosti kupke, kao što je prikazano na slici 2.35c [4, 30].

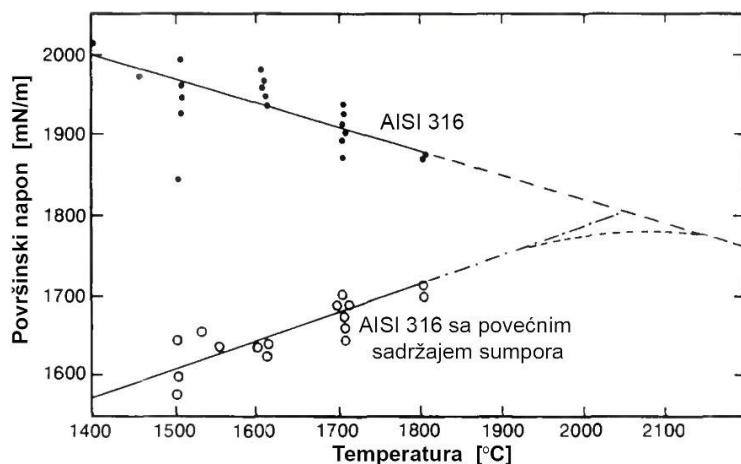
Na osnovu velikog broja koriš enih matemati kih modela konstatovano je da najve i uticaj od ove etiri sile na dubinu uvara i oblik šava ima uticaj sile površinskih napona, odnosno Marangonijev efekat [30, 37, 39].

2.3.6 Uticaj parametara zavarivanja:

2.3.6.1 Ja ina struje zavarivanja

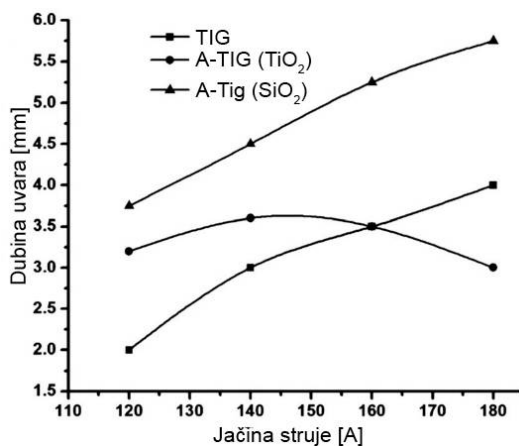
Sa porastom ja ine struje, raste i koli ina toplote koja u estvuje u pove anju dubine uvara. Me utim sa porastom ja ine struje poja ava se uticaj elektromagnetne sile i

aerodinami kog otpora. Elektromagnetna sila uti e na pove anje penetracije, dok sila aerodinami kog otpora uti e na pove anje širine šava [40].



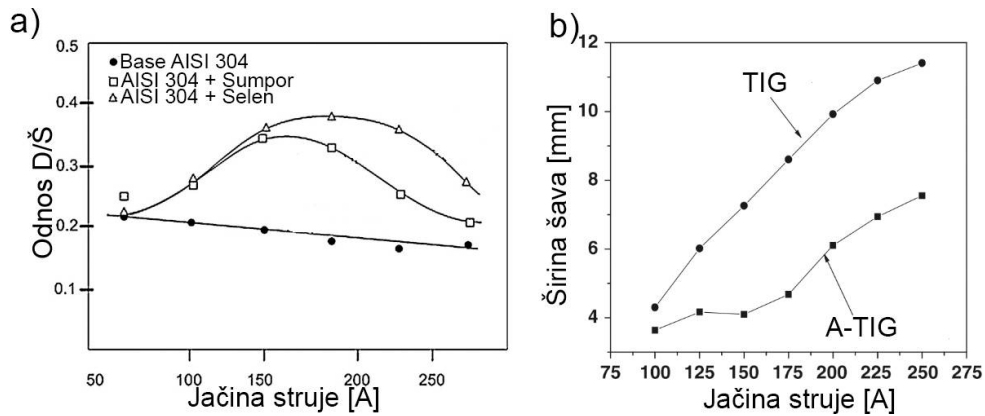
Slika 2.36 Uticaj temperature na površinski napon [40]

Na slici 2.36 prikazani su gradijenti površinskog napona kod ner aju eg elika AISI 316 i AISI 316 sa pove anim sadržajem sumpora, koji pri TIG zavarivanju predstavlja aktivni element, jer uti e na promenu kretanja rastopa metala šava . Sa pove anjem ja ine struje raste temperatura i površinski napon kod elika sa pove anim sadržajem sumpora što se odražava na pove anu penetraciju i uži šav [40]. Venkatesan sa saradnicima [41] je istraživao uticaj aktivnih premaza na elik AISI 304 (slika 2.37) gde se jasno može videti da je sa premazom na bazi SiO₂ dubina penetracije do 50% ve a nego bez premaza.



Slika 2.37 Uticaj aktivnih premaza na dubinu uvara [41]

Pored dubine uvara ja ina struje ima uticaja i na odnos dubine uvara i širine šava (D/Š). Kao što je re eno sa porastom ja ine struje pove ava se uticaj aerodinamickog otpora, pa se odnos D/Š smanjuje. Na slici 2.38a može se uo iti da se do odre ene ja ine struje odnos D/Š pove ava kod elika AISI 304 sa aktivnim elementima, nakon ega se smanjuje, me utim u svakom slu aju odnos je povoljniji nego kod materijala bez premaza [40, 42].

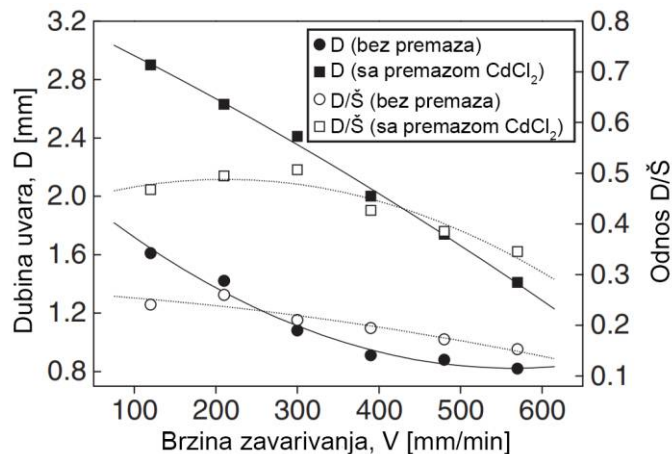


Slika 2.38 Uticaj jačine struje kod A-TIG postupka: a) na odnos D/\bar{S} [40], b) širinu šava [43]

U velikom broju istraživanja dobijeni su rezultati koji pokazuju da povećanje jačine struje ima mnogo manji uticaj na povećanje širine metala šava zavarenih A-TIG postupkom (slika 2.38b) [40, 43, 44].

2.3.6.2 Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je prosečna brzina kretanja zavarivačkog pištolja preko materijala koji se zavaruje i direktno utiče na količinu unosa toplote pri zavarivanju, a time ima direktan uticaj na geometriju metala šava. Manjom brzinom zavarivanja materijal bi se više zagrevao pa bi dubina uvara bila veća, ali i šav bi bio širi. Ukoliko je mala brzina zavarivanja kiseonik iz premaza ima dovoljno vremena da reaguje u rastopu i izazove obrnuti Marangonijev efekat, odnosno da usmeri kretanje sa površine ka korenu i na taj način da odnos D/\bar{S} bude veći i kod materijala gde postoji aktivni premaz (slika 2.39) [24, 45, 46].

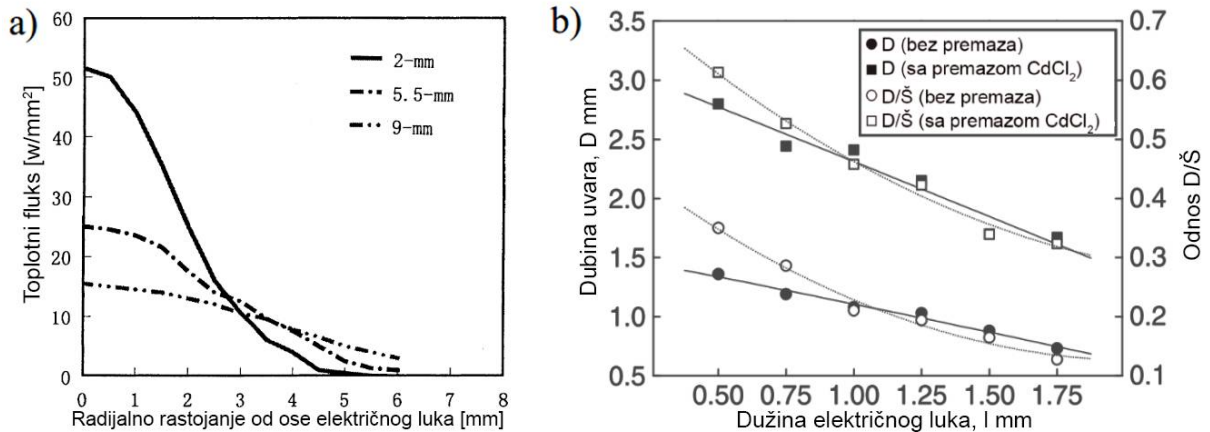


Slika 2.39 Uticaj brzine zavarivanja kod A-TIG-a [24]

2.3.6.3 Dužina električnog luka

Dužina električnog luka predstavlja razmak između elektrode i materijala. Povećanjem dužine luka dolazi do povećanja napona električnog luka pri istoj jačini struje. Električni luk je konusnog oblika, sa povećanjem rastojanja povećava se površina anodne mrlje što za posledicu ima smanjenje gustine toplotnog fluksa na površini materijala. Pri

ve o j dužini luka dolazi do ve eg gubitka toplote iz samog elektri nog luka zbog ve e konvekcije i zra enja (slika 2.40a) [24, 47].

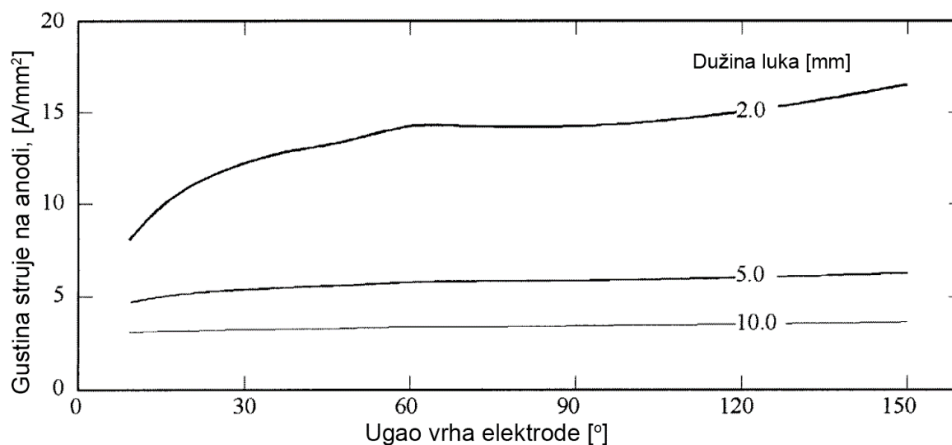


Slika 2.40 Uticaj dužine elektri nog luka: a) na toplotni fluks [47], b) na dubinu uvara i odnos D/Š [24]

Na slici 2.40b može se uo iti da dubina uvara i odnos D/Š se smanjuje sa porastom dužine luka kako kod materijala sa premazom tako i kod materijala bez aktivnog premaza.

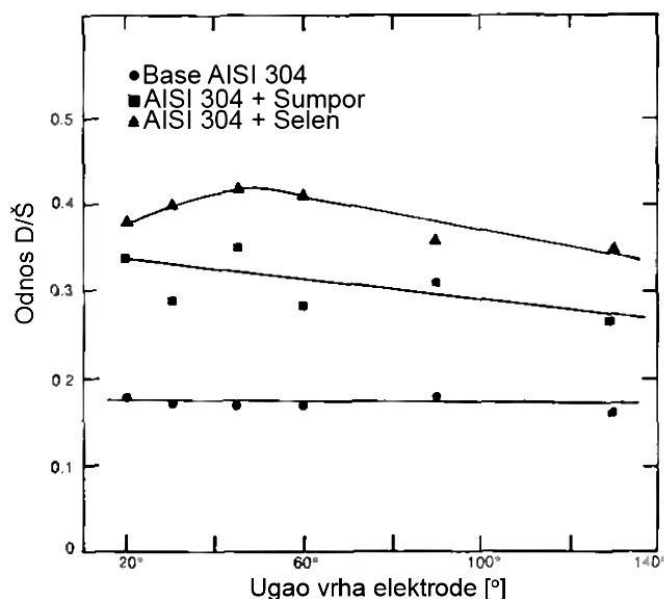
2.3.6.4 Geometrija elektrode

Geometrija elektrode kao što su pre nik elektrode, oblik vrha (konusni, ravan, zatupljen) i ugao konusa imaju veliki uticaj na oblik elektri nog luka. Ovi parametri su povezani sa ja inom struje, naponom i dužinom luka, a zajedno imaju uticaj na sile u rastopu metala. Konusni oblik elektrode ima uticaj na pove anje površine anodne mrlje samim tim i na smanjenje toplotnog fluksa na površini metala. Na slici 2.41 [48] prikazan je uticaj ugla konusa vrha elektrode i dužine elektri nog luka na gustinu struje na površini.



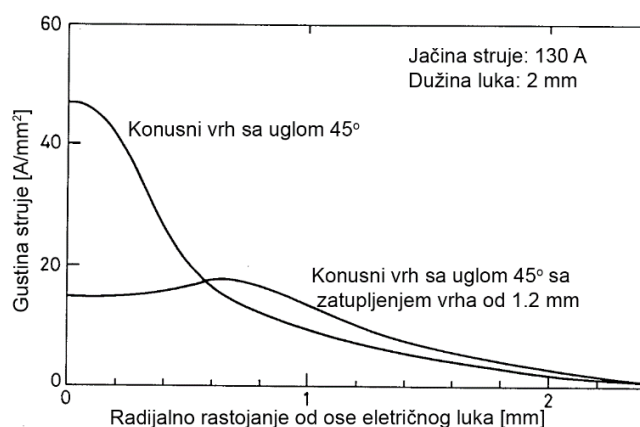
Slika 2.41 Uticaj ugla konusa vrha elektrode na gustinu struje na anodnoj mrlji [48]

Na osnovu ve eg broja istraživanja došlo se do zaklju ka da je najpovoljniji ugao od 45° jer pri tom uglu deluje najve i toplotni fluks [40, 49].



Slika 2.42 Uticaj ugla vrha elektrode na materijale sa aktivnim premazom [40]

Elektrode sa zatupljenim vrhom su tako i konusne pod određenim uglom, ali im je vrh zatupljen odnosno poravnat što za posledicu ima povećanje površine anodne mrlje i manji toplotni fluks na površini. Pored manje vrednosti toplotnog fluksa i gustina struje je manja u odnosu na koničnu elektrodu pa je dubina uvara, kao i odnos D/Š manji [30].

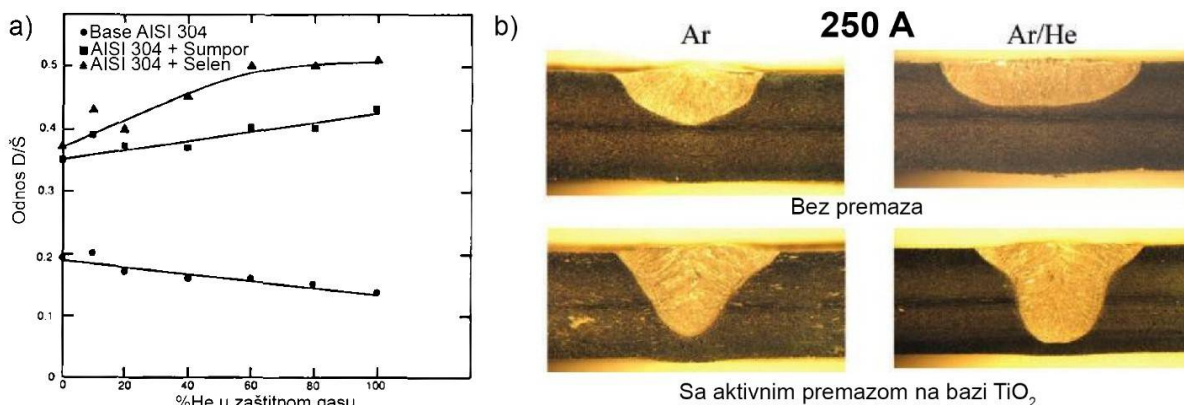


Slika 2.43 Uticaj oblika vrha elektrode na gustinu struje [30]

2.3.6.5 Zaštitni gas

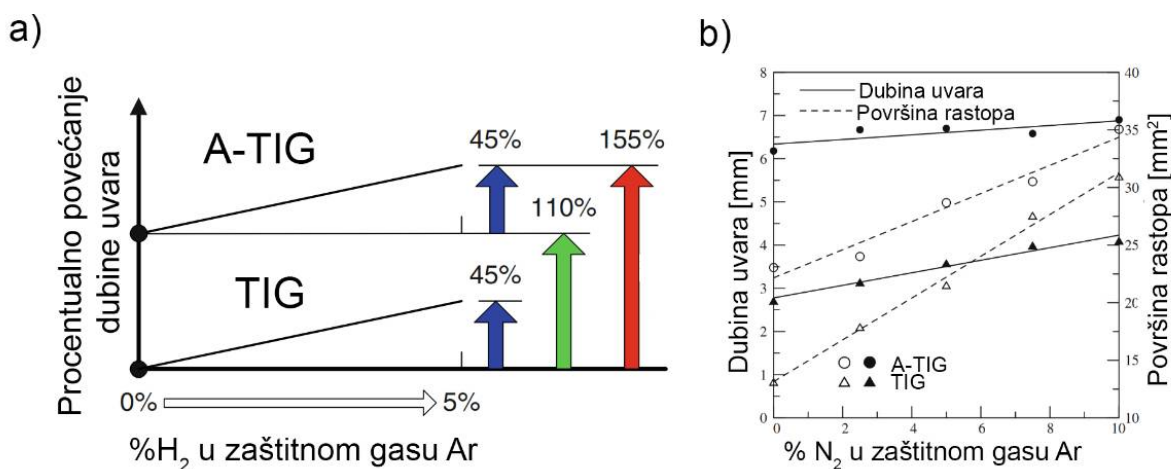
Pri A-TIG zavarivanju najčešće se koristi argon kao zaštitni gas, međutim zaštitni gas može biti i helijum kao i njihove međusobne mešavine, ali i mešavina sa azotom, kiseonikom, vodonikom. Zaštitni gasovi imaju različit potencijal jonizacije, samim tim direktno utiču na toplotni fluks pri zavarivanju. Na slici 2.44a prikazan je uticaj argona, helijuma, i njihove mešavine na odnos D/Š kod AISI 304, i AISI 304 sa sadržajem aktivnih elemenata [40]. Može se uočiti da odnos D/Š raste sa sadržajem helijuma kod materijala nerđajućeg elika AISI304 sa aktivnim elementima [40]. Slika 2.44b prikazuje izgled šava pri zavarivanju nerđajućeg elika AISI316 sa aktivnim premazom na bazi

TiO₂ u zaštitnoj atmosferi 100% Ar i 50% Ar - 50% He [50], gde se tako e se može uo iti da je ve i odnos D/Š pri koriš enju mešavine.



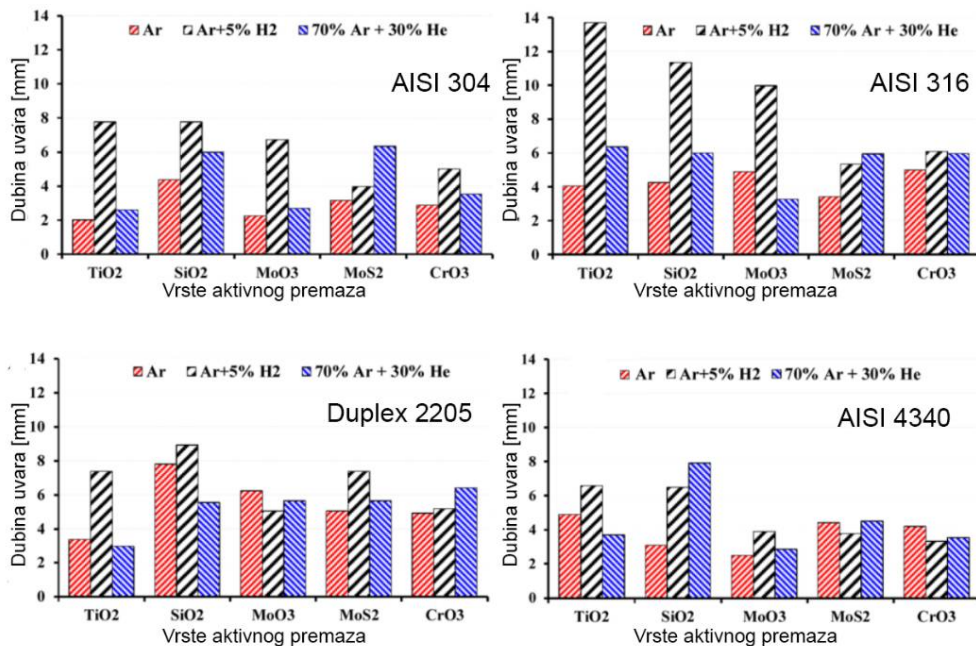
Slika 2.44 Uticaj zaštitnog gasa kod A-TIG postupka na: a) odnos D/Š [40], b) dubinu zavara [50]

Huang[51][51][51][51][51] [7, 51] je u svojim istraživanjima ispitivao mešavine argona sa vodonikom i argona sa azotom. Ustanovio je da dodavanje vodonika do 5% u argon pove a dubinu uvara do 45% u odnosu na ist argon kod materijala sa nanešenim aktivnim premazom (slika 2.45a) [7]. U drugom radu Huanga [51] argonu je postepeno dodavano do 10% azota i ustanovljeno je da sa ovakvim zaštitnim gasom dolazi do pove anja dubine uvara, ali u manjem procentu nego sa vodonikom (slika 2.45b).



Slika 2.45 Uticaj na dubinu uvara zaštitnog gasa: a) mešavina argona sa vodonikom [7], b) mešavina argona sa azotom [51]

Na slici 2.46 predstavljeni su rezultati istraživanja Tathgir [52] gde se može videti uticaj zaštitnih gasova u zavisnosti od baze aktivnog premaza na austenitnim ner aju em elicima AISI 304 i AISI 316, niskolegiranom eliku AISI 4340 i Duplex 2205 feritno/austenitnom ner aju em eliku.



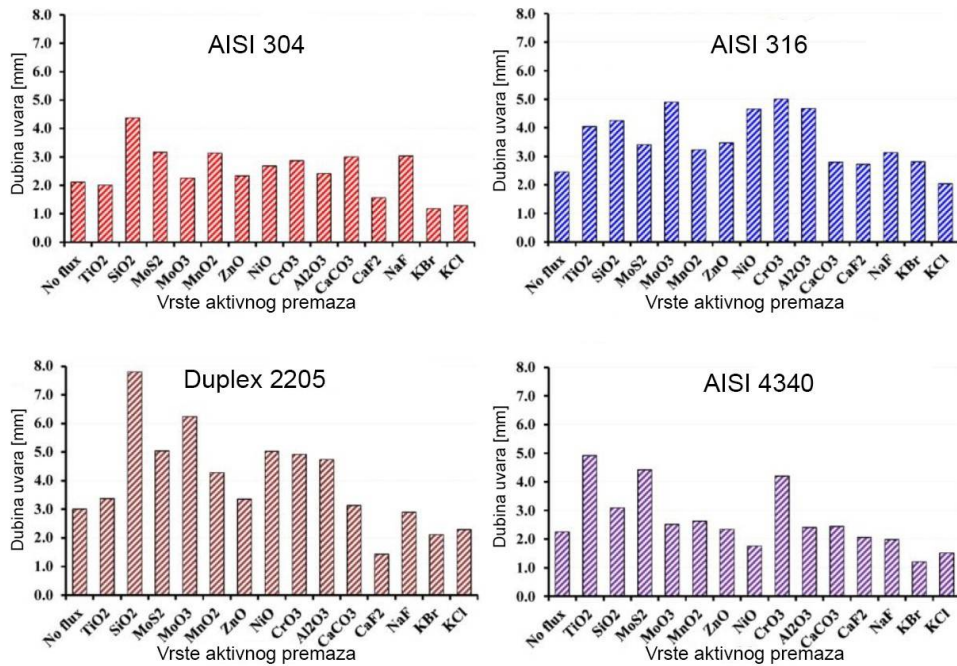
Slika 2.46 Uticaj zaštitnog gasa na dubinu uvara kod A-TIG postupka [52]

Postoje i pokušaji gde se aktivni elementi mešaju sa zaštitnim gasom. Kao primer u zaštitni gas argona dodavan je kiseonik (O_2). Rezultati su pokazali da je dubina uvara povećana, uz stvaranje oksida na površini materijala [29].

2.3.6.6 Aktivni premaz

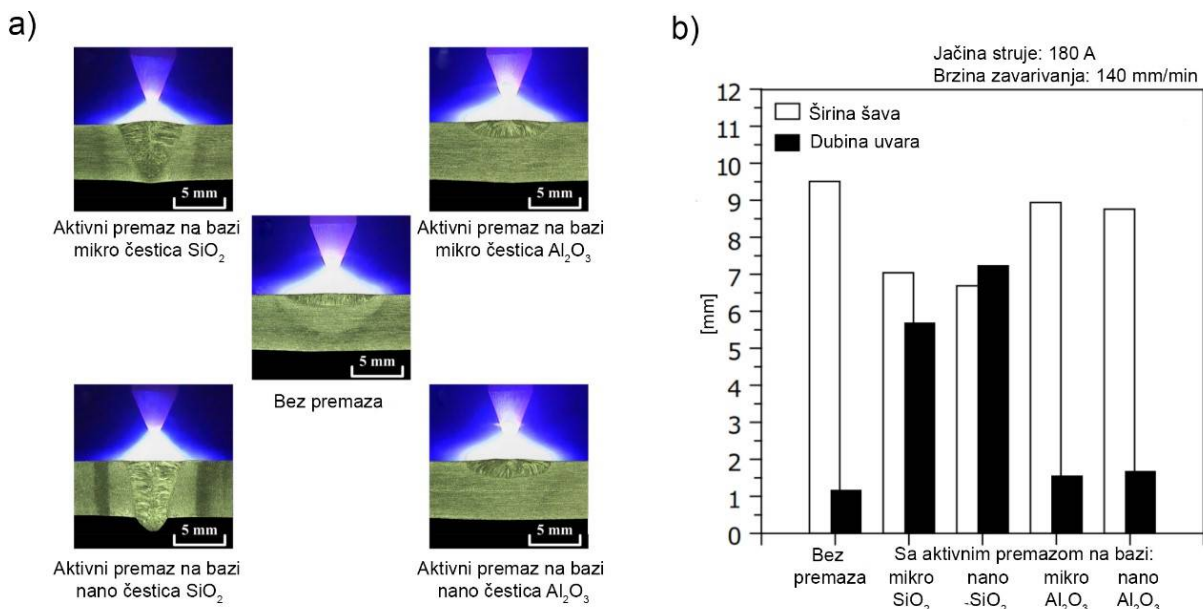
Uloga aktivnog premaza je da poveća dubinu uvara uz adekvatan odnos D/Š. Aktivni premaz se najčešće sastoji od oksida ili halida. Ovi sastojci izazivaju obrnuti Marangonijev efekat koji utiče na povećanje penetracije i do 200%, pored toga isparenja aktivnog premaza sužavaju električni luk pa je anodna mrlja sužena. Aktivni premaz nastaje tako što se čestice određenih elemenata nalaze u odgovarajućem rastvoru. U radovima su korišćeni različiti aktivni oksidi i fluoridi kao što su: SiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2 , ZnP , TiO_2 , MoO_3 , Cr_2O_3 , AlF_3 , CaF_2 , Fe_2O_3 kao čestice mikro i nano reda veličine, rastvorene u etanolu, acetonu i vodi [35, 41, 44, 46, 52–55].

Na slici 2.47 prikazan je uticaj aktivnih premaza na dubinu uvara kod AISI 304, AISI 316 Duplex 2205 i AISI 4340 [52]. Jačina struje pri zavarivanju je bila 120 A, a protok zaštitnog gasa argona je 10 l/min. Dubina uvara pri određenim aktivnim premazima je do 250% veća nego pri zavarivanju sa istim parametrima bez premaza.



Slika 2.47 Uticaj aktivnih premaza na dubinu uvara kod A-TIG postupka [52]

Pored vrste aktivnih elemenata uticaj imaju i veličine čestica kako je prikazano na slici 2.48 [52]. Na slici 2.48a prikazan je oblik metal šava pri zavarivanju bez aktivnog premaza i sa aktivnim premazima SiO_2 i Al_2O_3 sa česticama mikro i nano veličine. Uočljivo je da je dubina uvara veća pri korišćenju nano čestica. Vrednost dubine uvara i vrednost širine metal šava prikazane su na slici 2.48b. Dubina uvara pri korišćenju aktivnog premaza pri istim parametrima veća je i preko 500% u odnosu na dubinu uvara bez aktivnog premaza.



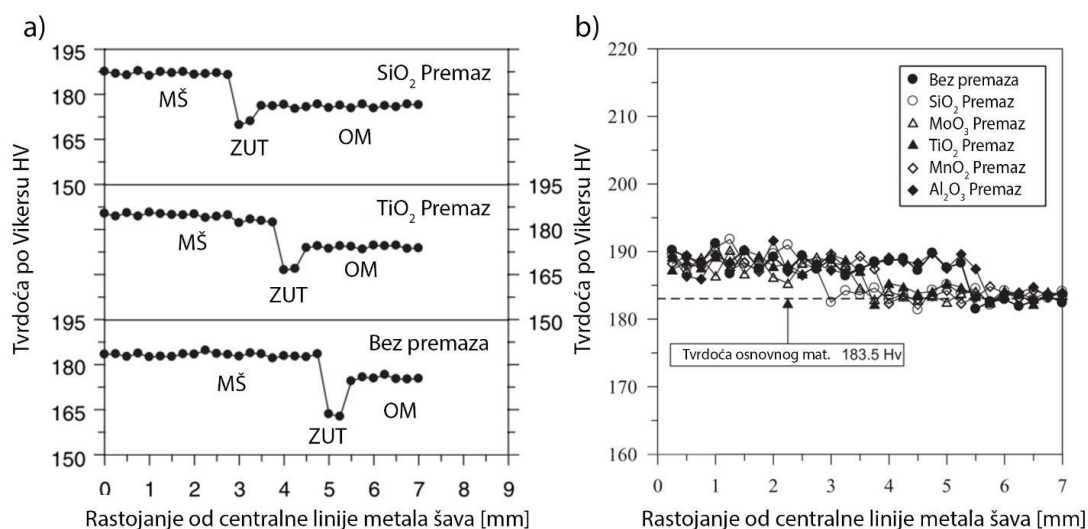
Slika 2.48 Uticaj veličine čestica na [55]: a) oblik metal šava, b) dubinu i širinu šava

2.3.7 Uticaj aktivnog premaza na mehani ke osobine

2.3.7.1 Mikrotvrdo a

Vrednost tvrdo e zavarenih spojeva je esto propisana standardom za odgovaraju u grupu materijala. Nakon zavarivanja tvrdo a ne sme biti iznad dozvoljenih vrednosti u metalu šava i oblasti ZUT-a.

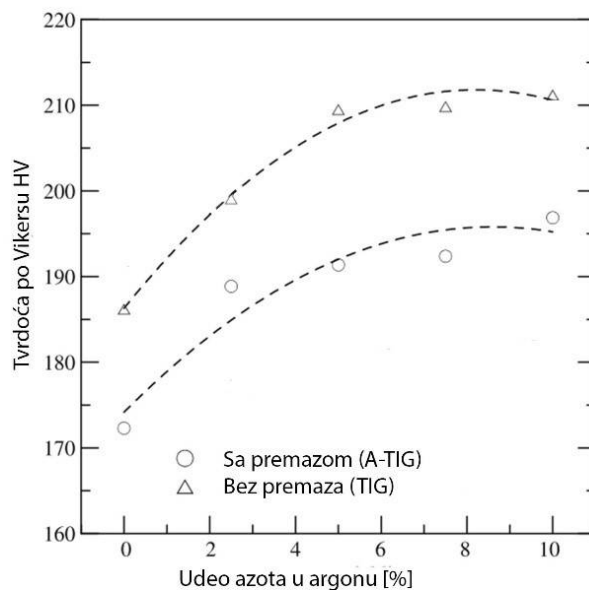
Uticaj aktivnog premaza na rezultate tvrdo e zavisi od vrste materijala koji se zavaruje. Na slici 2.49 vidi se uticaj razli itih vrsta premaza na promenu tvrdo e u ner aju em eliku AISI 316L [36, 53]. Mikrotvrdo a je merena metodom Vickers sa optere enjem od 300 g.



Slika 2.49 Profil tvrdo e metalna šava: a) K.-H. Tseng i K.-L. Chen [36] b) K.-H. Tseng i C.-Y. Hsu [53]

Sa slike 2.49 vidi se da se vrednosti mikrotvrdo e nakon zavarivanja upotrebom aktivnog premaza znatno ne menjaju u odnosu na mikrotvrdo e dobijenih kod uzorka bez aktivnog premaza. Može se videti da kod upotrebe aktivnog premaza na manjem rastojanju od centra dolazi do smanjenja tvrdo e. Sli ne rezultate tvrdo e na eliku AISI 316L postigli su A. Hdhibi i saradnici [56].

Prilikom zavarivanja AISI 304 u zaštitnom gasu mešavine argona i azota (do 10%) sa premazom na bazi MnO₂ + ZnO estica rastvorenih u acetonu, ustanovljeno je da su vrednosti tvrdo e manje nego pri zavarivanju bez aktivnog premaza (slika 2.50) [51].

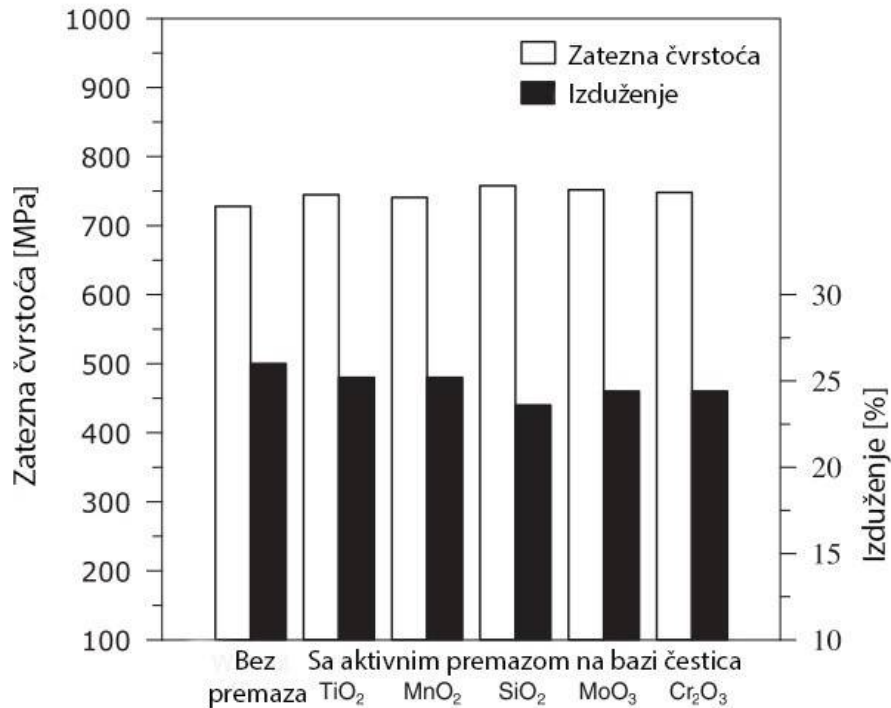


Slika 2.50 Uticaj aktivnog premaza i procenta azota u argonu na tvrdoću [51]

2.3.7.2 Zatezane karakteristike

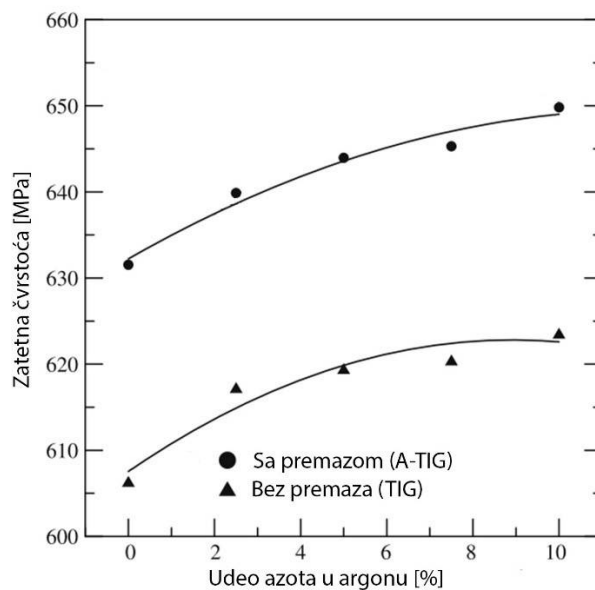
Zatezna vrsta predstavlja jednu od osnovnih osobina materijala i propisana je standardom za odgovarajuću grupu materijala. Osnovni materijal koji se zavaruje ima zateznu vrstu u propisanim granicama. Tokom zavarivanja dolazi do promene mikrostrukture zbog uticaja temperature i upotrebe dodatnog materijala, pa zatezna vrsta zavarenog spoja može odstupati od vrednosti osnovnog materijala, ali mora biti u standardnom propisanim granicama. Kod A-TIG zavarivanja se ne koristi dodatni materijal, ali ima prisustvo elemenata iz aktivnog premaza koji mogu uticati na zatezne karakteristike metala šava.

Prilikom zavarivanja nerđelika AISI 2205 bez premaza i sa više vrsta aktivnih premaza ustanovljeno je da dobijene zatezne karakteristike su iste ili malo više u odnosu na klasično TIG zavarivanje [54]. Na slici 2.51, prikazana je promena zatezne vrste i izduženja u zavisnosti od upotrebe i vrste aktivnog premaza.



Slika 2.51 Uticaj aktivnog premaza na zatezne karakteristike [54]

H. Huang je u radu [51] zavarivanje A-TIG postupkom koristio je materijal AISI 304 debljine 5 mm. Kao aktivni premaz koristi mešavinu estica MnO₂ i ZnO u odnosu 4:1 u acetonu, a zaštitni gas je mešavina argona sa azotom. Rezultati zateznih karakteristika prikazane su na slici 2.52 i može se videti da su zatezne karakteristike sa upotrebom istog argona malo niže od vrednosti dobijenih bez upotrebe premaza, dok zatezne karakteristike rastu sa udelom azota u zaštitnom gasu.



Slika 2.52 Promena zateznih karakteristika sa upotrebom aktivnog premaza i porastom % azota u argonu kao zaštitnom gasu [51]

2.3.8 Sumarni pregled postignutih dubina uvara A-TIG postupkom

Upotrebom TIG postupaka zavarivanja mogu se dobiti visoko kvalitetni zavareni spojevi, koji imaju visoke mehaničke osobine uz veoma dobar estetski izgleda metala šava. Zbog kvalitetnog zavarenog spoja veliku primenu ima u izradi korenog prolaza u više prolaznom zavarivanju. Međutim, zbog male penetracije proces je spor i skup. Zbog toga su razvijeni aktivni premazi koji se i danas usavršavaju i kombinuju sa raznim mešavinama zaštitnih gasova i savremenim mogu postojati novih aparata za zavarivanje. Aktivni premazi nemaju jednak uticaj na sve materijale, već određeni deluju bolje na jednu grupu materijala, dok drugi premazi deluju na drugu grupu materijala.

Najveća zavarena debljina materijala u jednom prolazu upotrebom aktivnog premaza je 12 mm na neravnom eliku AISI 316LN, prema navodu datom u patentu US8097826 [57]. Korišćena je jačina struje od 325 A, a aktivni premaz je u obliku paste i sastavljen je od mešavine oksida TiO_2 , SiO_2 , CrO_3 , NiO i CuO .

Kao što je već rečeno veliki broj faktora utiče na dobijanje većih dubina uvara. Da bi proces bio pouzdan potrebno je sve te parametre uskladiti. Neravni elici su najčešće korišćeni materijali za ispitivanje dubine uvara korišćenjem aktivnih premaza. Najčešće korišćen elik u radovima je elik AISI 316L (ekv. EN X2CrNiMo17-12-2). Pomenuti elik debljine 6 mm moguće je provariti sa jačinom struje oko 200 A i brzinom zavarivanja oko 150 mm/min uz upotrebu aktivnog premaza na bazi SiO_2 [36, 42, 53, 58]. U radu Tsenga i Hsu [53] upotrebom aktivnog premaza na bazi TiO_2 na eliku AISI 316L debljine 6 mm nije postignut je provar. Međutim, na neravnom eliku AISI 316 (ekv. EN X5CrNiMo17-12-2) koji ima samo malo vešćeg sadržaja ugljenika Hđhibi i saradnici [56] su uspeli sa manjom jačinom struje od 150 A, pri brzini 150 mm/min da provare debljinu od 6 mm.

Pored AISI 316L ispitivanja su vršena i na AISI 304 (ekv. EN X5CrNi18-9). U radu [7] u potpunosti je zavaren je elik AISI 304 debljine 5 mm sa jačinom struje 125 A sa brzinom zavarivanja od 75 mm/min, gde je aktivni premaz mešavina oksida, a zaštitni gas mešavina argona sa azotom. Sa istim parametrima, ali sa drugom drugim aktivnim premazom, koji se sastoji od MnO_2 i ZnO , Huang je ostvario potpunu penetraciju na 5 mm debljine [51]. Materijal AISI 304 debljine 5 mm koristili su Modenesi i saradnici [59] gde su sa jačinom struje 200 A i brzinom od 200 mm/min sa premazom na bazi Cr_2O_3 postigli potpunu penetraciju. Pri zavarivanju neravne elika AISI 304H sa elikom P92 (ekv. EN X10CrWMoVNb9-2) debljina 8 mm, korišćen je aktivni premaz sa oksidima TiO_2 , sa jačinom struje od 220 A i brzinom zavarivanja 80 mm/min, postignuto je potpuno zavarivanje [60]. Neravni elik AISI 304L, sličan eliku AISI 304 samo sa nižim sadržajem ugljenika, korišćen je u radu [41]. Debljina materijala je bila 10 mm, struja zavarivanja 180 A, a brzina zavarivanja 80 mm/min. Međutim, nakon zavarivanja postignuta je nepotpuna penetracija, odnosno dubina uvara je iznosila 5,75 mm.

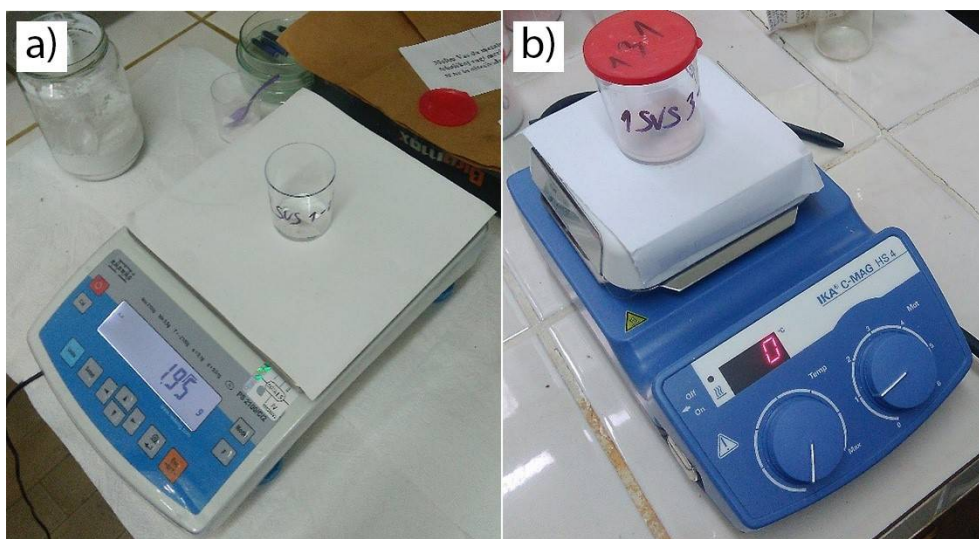
3 Eksperimentalna istraživanja

3.1 Uvodna istraživanja

S obzirom da su premazi za povećanje dubine uvara kod TIG postupka atraktivni proizvodi, emu svedo i relativno veliki broj patenata u toj oblasti, kao i zbog kontradiktornih rezultata u brojnim publikacijama, ocenjeno je da postoji neophodnost za izvođenjem uvodnih istraživanja, kako bi se pronašli optimalni parametri za postizanje što veće dubine uvara. U uvodnim istraživanjima zbog racionalnosti je korišćeno pretapanje, odnosno, TIG elektrodom se prelazilo preko osnovnog materijala, a osnovni kriterijum za procenu kvaliteta parametara je bila dubina pretapanja osnovnog materijala. Iz tog razloga u uvodnim istraživanjima je izvršena optimizacija: masenog udela estica, odabira rastvarača, vrste i veličine estica, geometrije elektrode, brzine pretapanja i jačine struje. Na osnovu uvodnih istraživanja odabrani su parametri zavarivanja i sastav aktivnog premaza kako bi se u okviru završnih istraživanja izvršila provera: makro i mikrostrukture, hemijskog sastava, mehaničkih osobina i morfologije površine loma. Rezultati završnih istraživanja su procenjeni na osnovu relevantnih standarda za ovu oblast.

3.1.1 Eksperiment I – Određivanje uticaja masenog udela estica TiO_2 u aktivnom premazu na dubinu uvara

Kako je već rečeno aktivni premaz predstavlja suspenziju estica aktivnih elemenata u rastvaraču. Cilj prvog eksperimenta je bio da se ustanovi koji procenat estica aktivnih elemenata u suspenziji ima najveći uticaj na dubinu uvara. Kao estice korišćene su estice TiO_2 dobijene sintetičkim putem, nominalne veličine 300 nm, a kao rastvarač je korišćen etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Za odmeravanje masa etanola i estica, u cilju određivanja masenog udela, korišćena je tehnička vaga Rad-Wag PS 2100/c/2 (ta nosi 10 mg), slika 3.1a. Pripremljene su tri suspenzije, masa 2g, u sledećim odnosima: 5% TiO_2 95% etanol, 10% TiO_2 90% etanol i 20% TiO_2 80% etanol. Nakon što su u posudi dodate odmerene količine etanola i estica, dalja homogenizacija je izvršena na elektromagnetnom mešalu uz pomoć magnetnog jezgra (slika 3.1b).



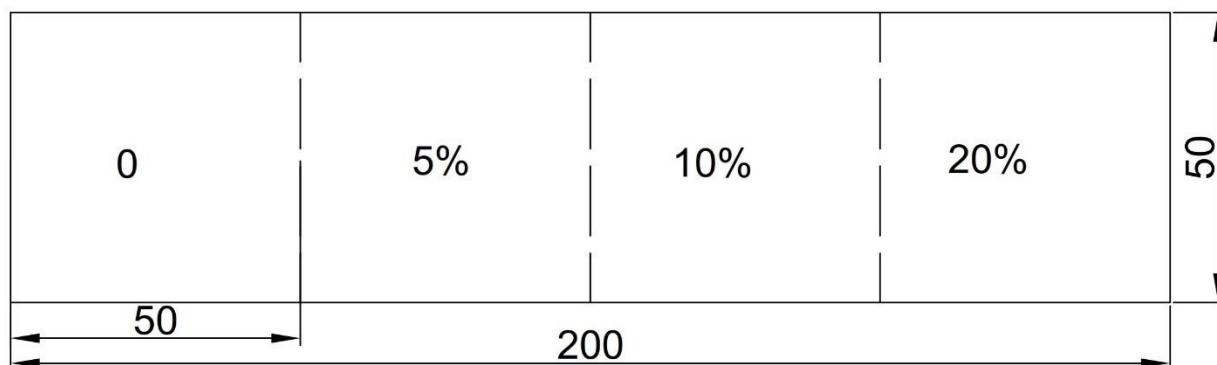
Slika 3.1 Proces pripremanja aktivnog premaza: a) tehni ka vaga, b) elektromagnetni meša

Da bi se najbolje uo io uticaj promene oblika metala šava, vršeno je pretapanje na plo ama dužine 200 mm, širine 50 mm i debljine 15 mm od ner aju eg elika AISI 304L po standardu ASTM A240/A240M-04:2004 (ekv. X2CrNi18-9 po standardu SRPS EN 10088-2:2003), iji je nominalni hemijski sastav dat u tabeli 3.1,

Tabela 3.1 Hemijski sastav materijala AISI 304L po standardu

Hemijski elementi							
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	N [%]	Ni [%]
0,03	1	2	0,045	0,030	17-19,5	0,110	8-10,5

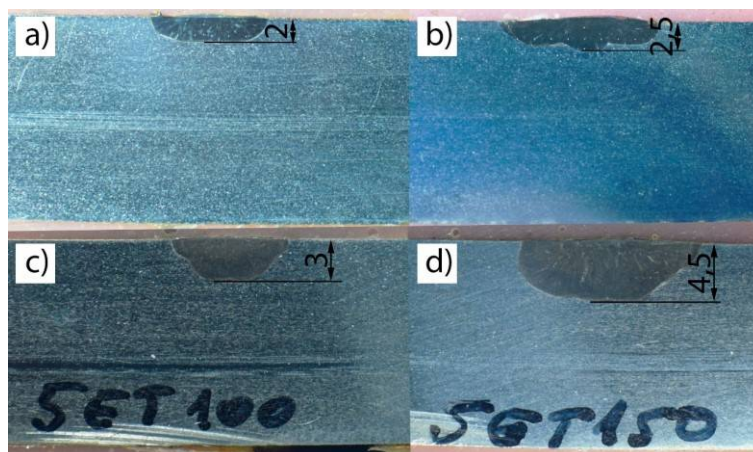
Proces pretapanja je vršen bez dodatnog materijala na aparatu za TIG zavarivanje Iskra KND 350. Koriš ena je elektroda na bazi volframa legirana sa 2% torijum oksida (ThO_2) pre nika 2,4 mm sa uglom vrha 60° koja se po standardu ISO 6848:2004 obeležena crvenom bojom. Pre nik mlaznice oko elektrode je bio 10 mm. Pretapanje je vršeno ru no pri jednosmernoj struji direktne polarnosti i ja inama struje od 100 i 150, sa brzinom pretapanja oko 100 mm/min. Kao zaštitni gas je koriš en argon sa protokom od 10 l/min. Za ovaj eksperiment iskoriš ene su dve plo e, koje su pre pretapanja odmaš ene etanolom. Na svakoj plo i su obeležene 4 oblasti od 50 mm (slika 3.2) i postavljene su na radni sto. Na prvu oblast od 0 - 50 mm nije nanešen premaz odnosno predstavlja „nulti“ uzorak. Druga oblast, od 50-100 mm, premazana je sa aktivnim premazom od 5% TiO_2 , tre a oblast, od 100-150 mm premazana je sa aktivnim premazom od 10% TiO_2 i etvrta oblast od 150-200 mm koja je premazana aktivnim premazom od 20% sinteti kog TiO_2 (slika 3.2).



Slika 3.2 Šema raspodele oblasti na kojima je nanešen premaz

Premaz je nanešen na ploču u širini oko 20 mm etkicom širine 8 mm. Nakon što je etanol ispario prva ploča je pretopljena jačinom struje 100 A, druga ploča je pretopljena jačinom struje 150 A.

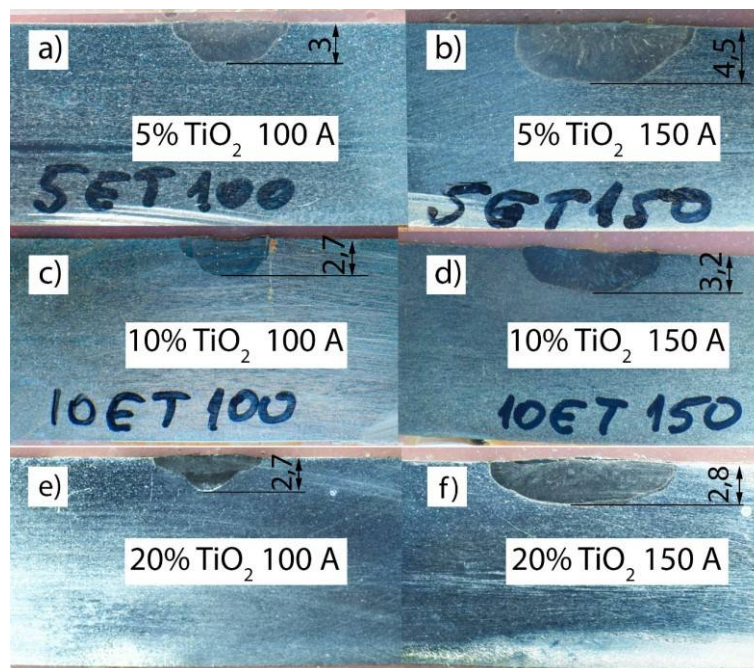
Nakon pretapanja uzorci su iz ploče prvo isečeni brusilicom poprečno na pravac pretapanja, nakon toga je izvršeno naknadno isecanje mašinom Struers diskotom sa aktivnim hlađenjem vodom, kako bi se izbeglo zagrevanje uzorka i promena mikrostrukture. Tako isečeni uzorci su zatopljeni u polimer Singal (PMMA), potom su brušeni na mašini Struers Knuth Rotor brusnim papirima postepeno poev od grubog brusnog papira (P360) pa do najfinijeg brusnog papira (P2500). Po završetku brušenja uzorci su polirani na mašini Struers DP-U2 dijamantskim suspenzijama od 6 μm do 1 μm . Nakon makro provere uzoraka, pri čemu je utvrđeno da na poliranim uzorcima nema poroznosti i uključaka, uzorci su potopljeni u Carsku vodu ($\text{HNO}_3+3 \text{HCl}$) radi nagrizanja, odnosno razvijanja mikrostrukture. Posle nagrizanja uzoraka, na svetlosnom mikroskopu Leitz Orthoplan izmerene su dimenzije metalne šava. Makrostruktura je snimljena digitalnim fotoaparatom Canon a70.



Slike 3.3 Izgled metalne šava kod uzoraka: a) uzorak bez premaza, jačina struje 100 A, b) uzorak bez premaza, jačina struje 150 A, c) uzorak sa aktivnim premazom, jačina struje 100 A, d) uzorak sa aktivnim premazom, jačina struje 150 A

Sa slike 3.3 može se videti da značajno veća dubina uvara, veća površina rastopljenog metala šava i užiji metalni šav imaju uzorci sa korišćenim aktivnim premazom. Takođe sa

slike se vidi da sa porastom ja ine struje zna ajniji rast ima širina metal šava u odnosu na dubinu uvara.



Slika 3.4 Izgled šava kod uzoraka sa aktivnim premazom: a) 5% aktivnog premaza, ja ina struje 100 A, b) 5% aktivnog premaza, ja ina struje 150 A, c) 10% aktivnog premaza, ja ina struje 100 A, d) 10% aktivnog premaza, ja ina struje 150 A, e) 20% aktivnog premaza 100 A, f) 20% aktivnog premaza 150 A

Dubina uvara pored ja ine struje zavisi i od masenog udela estica sinteti kog TiO₂ u suspenziji sa etanolom. Na slici 3.4 prikazana su uzorci sa tri razli ita premaza i dve razli ite ja ine struje. Sa slike se jasno vidi da je dubina uvara ve a kod uzoraka sa 5% TiO₂ estica u suspenziji, pri obe ja ine struje, u odnosu na suspenzije sa 10 i 20%.

Na osnovu rezultata prvog eksperimenta može se konstatovati da je najbolja penetracija postignuta sa 5% aktivne komponente TiO₂ u etanolu.

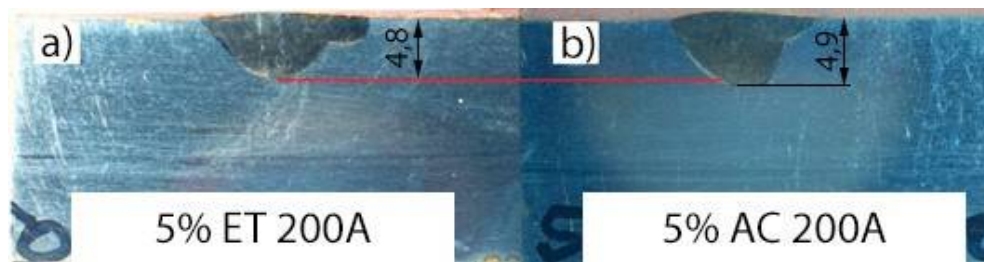
3.1.2 Eksperiment II – Odre ivanje uticaja rastvara a

U drugom eksperimentu ispitan je uticaj rastvara a i 5% estica TiO₂ u aktivnom premazu na dubinu uvara. Kao rastvara i, koriš eni su etanol i aceton. Proces pripremanja premaza je identi an kao u prvom eksperimentu, pri emu su pripremljena dva premaza sa istom koli inom aktivnih estica u dva razli ita rastvara a: 5% TiO₂ – 95% etanol i 5%TiO₂ – 95% aceton (C₃H₆O). Proces pretapanja je ura en sa identi nim parametrima kao u eksperimentu I, sa ja inama struje 100, 150 i 200 A. Dimenzije uzorka su 300 mm x 30 mm x 15 mm. Na rastojanju 15 mm od druge bo ne ivice vršeno je pretapanje na deo materijala gde je nanešen aktivni premaz. Na prvoj polovini dužine nanešen je aktivni premaz sa TiO₂ esticama i etanolom kao rastvara em, a na drugoj polovini aktivni premaz sa TiO₂ esticama rastvorim u acetonu. Na svakih 50 mm pretapanja pove avana je ja ina struje do 200 A, a nakon toga na drugoj polovini plo e smanjivana do 100 A. Dobijeni pretopljeni šav prikazan

je na slici 3.5, gde se može videti razlika na licu metala šava uzorka sa premazom na bazi acetona i etanola.



Slika 3.5 Izgled uzorka nakon pretapanja



Slika 3.6 Izgled metala šava: a) uzorak sa premazom na bazi etanola, b) uzorak sa premazom na bazi acetona

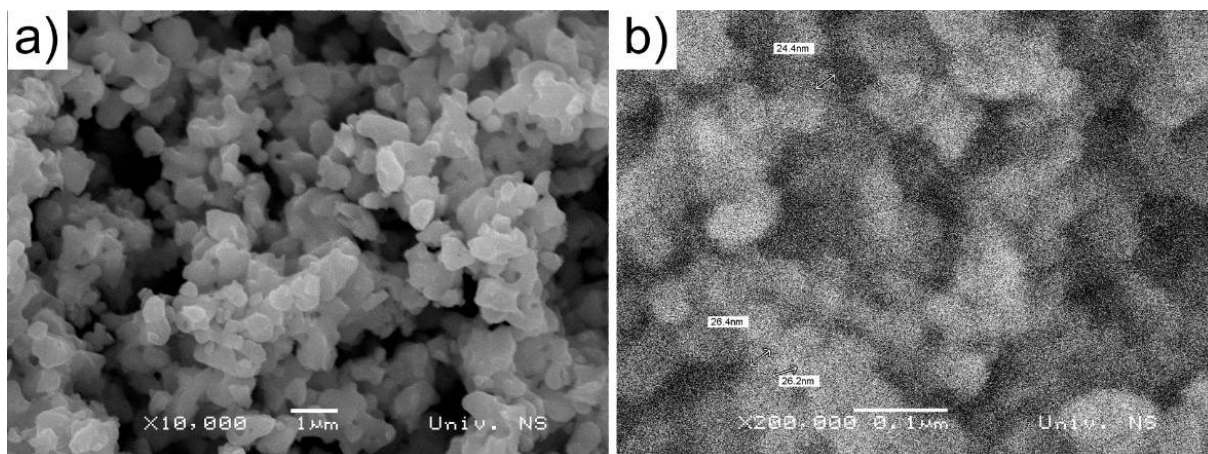
Nakon standardne metalografske pripreme uzorka izvršena su višestruka merenja dimenzija metal šava i pore enje dobijenih rezultata. Na slici 3.6 prikazani su reprezentativni uzorci dobijeni upotrebom aktivnog premaza sa ja inom struje pretapanja 200 A. Na osnovu svih dobijenih rezultata dubine uvara konstatovano je da je dubina uvara ve a kod uzorka gde je koriš en aktivni premaz na bazi acetona.

3.1.3 Eksperiment III – Odre ivanje uticaja oblika vrha elektrode i udela nano i submikronskih estica TiO_2

U narednom eksperimentu kao aktivne komponente koriš enu su estice TiO_2 razli ite veli ine, kao i njihove mešavine masenog udela od 5% u rastvoru acetona:

- 5% Mikro TiO_2 (5M)
- 4% Mikro + 1% Nano TiO_2 (4M1N)
- 3% Mikro + 2% Nano TiO_2 (3M2N)
- 2% Mikro + 3% Nano TiO_2 (2M3N)
- 1% Mikro + 4% Nano TiO_2 (1M4N)
- 5% Nano TiO_2 (5N)

Veli ina mikro estica je 300 nm, dok su nano estice veli ine 20 nm (slika 3.7).

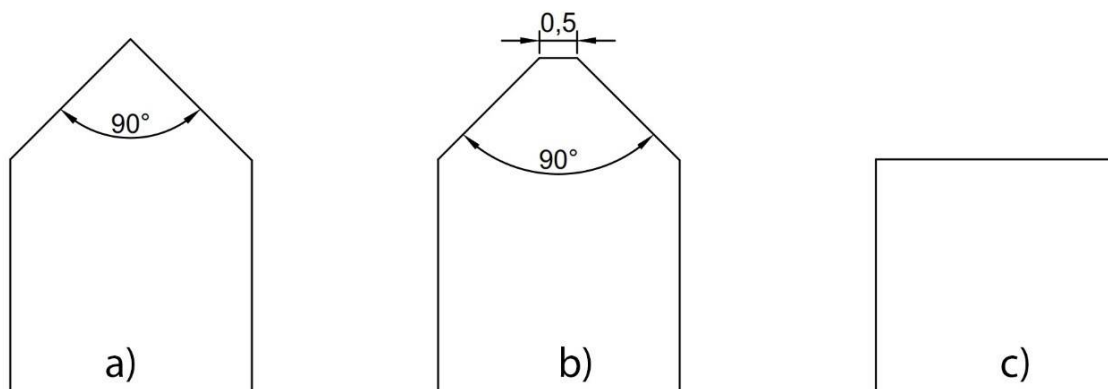


Slika 3.7 estice koriš ene za pripremu premaza: a) veli ine 300 nm, b) veli ine 20 nm (SEM)

Nakon pripreme aktivnih premaza, deo premaza je iskoriš en za pretapanje, dok je na preostalom delu izvršeno ispitivanje veli ine estica u rastvoru na ure aju Malvern ZetaSizer Nano ZS. Pored razli itih aktivnih premaza, koriš ena su i tri oblika vrha elektrode pre nika 2,4 mm:

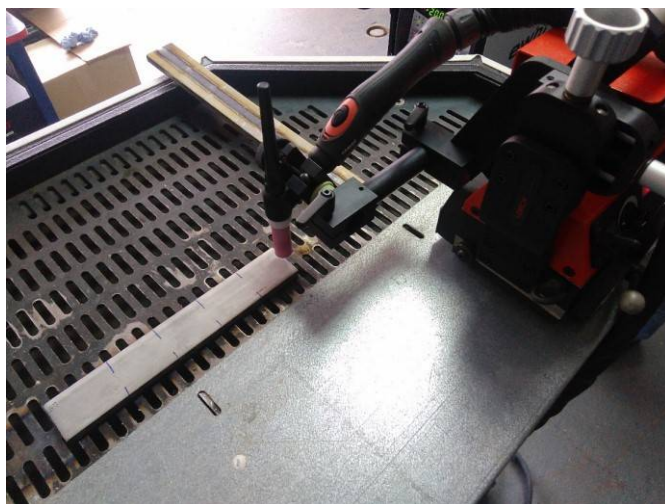
- oštra elektroda sa uglom 90° (O),
- elektroda sa zatupljenim vrhom ugla 90° i pre nikom na vrhu 0,5 mm (Z) i
- tupa elektroda, odnosno elektroda sa uglom od 180° (T),

kao što je prikazano na slici 3.8.



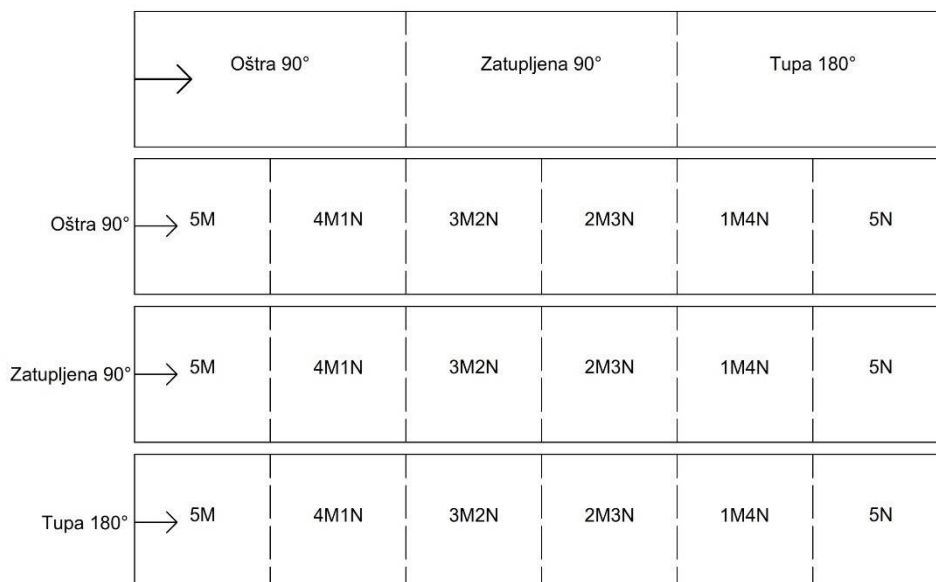
Slika 3.8 Izgled vrha elektrode: a) elektroda sa oštrim vrhom (O), b) elektroda sa zatupljenim vrhom (Z), c) elektroda sa tupim vrhom (T)

Elektrode su od legure volframa sa dodatkom 2% torijum oksida i naoštrene su na ure aju za oštrenje volframovih elektroda LORH Teg. Pretapanje je ura eno na aparatu za TIG zavarivanje EWM Tetrix 300, sa jednosmernom strujom, direktne polarnosti, ja ine 200 A. Oko elektrode se nalazila kerami ka mlaznica pre nika 12,7 mm sa prepustom elektrode 10 mm. Rastojanje vrha elektrode od osnovnog materijala iznosilo je 1 mm, a protok zaštitnog gasa argona je bio 12 l/min. Brzina pretapanja je bila 100 mm/min, kako bi se postigla ravnomerna brzina pretapanja koriš en je automatizovani nosa TIG pištolja Lorch WL But (slika 3.9). Aparat za zavarivanje je podešen na paljenje i rad sa 4 takta, kako bi elektri ni luk bio postojan bez držanja pritisnutog prekida a.



Slika 3.9 Postavka za pretapanje

Pretapanje je izvršeno na 4 ploče tako da se od nerđajućeg čelika AISI 304L dimenzija 300 mm x 50 mm x 10 mm. Ploče su pre pretapanja odmašene etanolom. Jedna ploča je pretopljena bez aktivnog premaza tako što je podijeljena u 3 oblasti (slika 3.10). Prva oblast od 0 do 100 mm je pretopljena sa oštrim elektrodom ugla 90° (O), druga oblast od 100 do 200 mm je pretopljena sa zatupljenom elektrodom (Z) i treća oblast od 200 do 300 mm je pretopljena sa tupom elektrodom (T). Preostale tri ploče su podijeljene na 6 oblasti od 50 mm. Svaka oblast je premazana drugim aktivnim premazom koji je nanešen nekorištenom etikom. Ploče su pretopljene po sredini celom dužinom jednim oblikom vrha elektrode kao što je prikazano na slici 3.10.



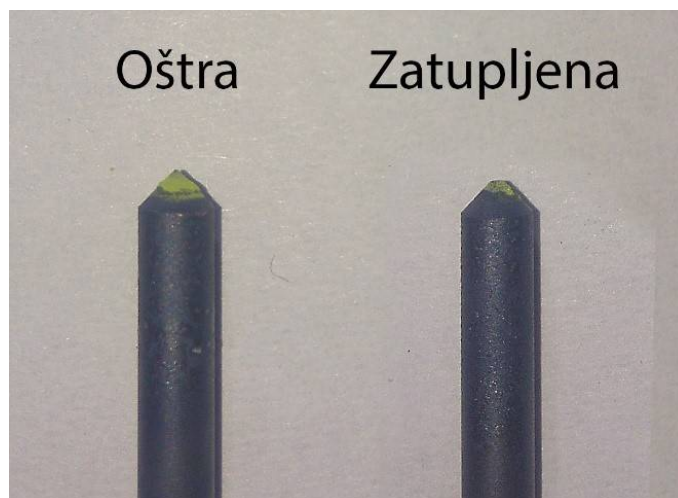
Slika 3.10 Šema pretapanja

Nakon pretapanja (slika 3.11) iz svake oblasti uzet je po jedan uzorak za makro, mikro ispitivanje i merenje mikrotvrdoće u oblastima pretopljenog metala šava.



Slika 3.11 Izgled pretopljenih uzoraka

Nakon procesa pretapanja na elektrodama nisu uo ni tragovi trošenja, na oštroj i zatupljenoj elektrodi na stranama konusa vidljivi su tragovi za koje se pretpostavlja da su od isparenih oksida, koji se brisanjem lako odstranjuju. Me utim, na svim elektrodama je došlo do potamnjenja kao posledica vremenski nedovoljno dugog strujanja zaštitnog gasa oko elektrode po završetku procesa (slika 3.12).



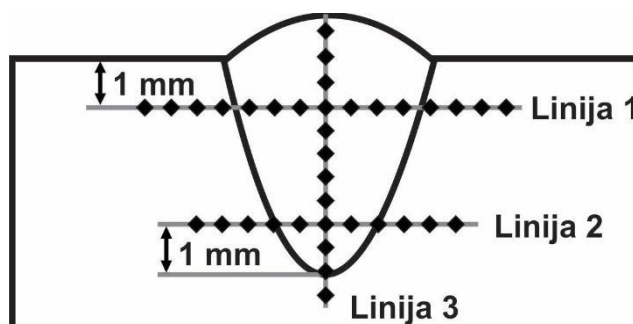
Slika 3.12 Izgled elektroda nakon pretapanja

Priprema uzoraka za ispitivanje ura ena je standardnim postupkom metalografske priprema kako je opisano u I eksperimentu. Jedina razlika je što su uzorci zatapani u polimer na Struers Prontopress mašini.

Makro i mikro ispitivanja su ura ena na svetlosnom mikroskopu Leitz Orthoplan, na kome su izvršena i merenja dimenzija metala šava.

Mikrotvrdo a po Vickersu je izmerena na ure aju Tukon 1102 u nekoliko linija kroz osnovni materijal, zonu uticaja toplote i metal šava, prema šemi sa slike 3.13.

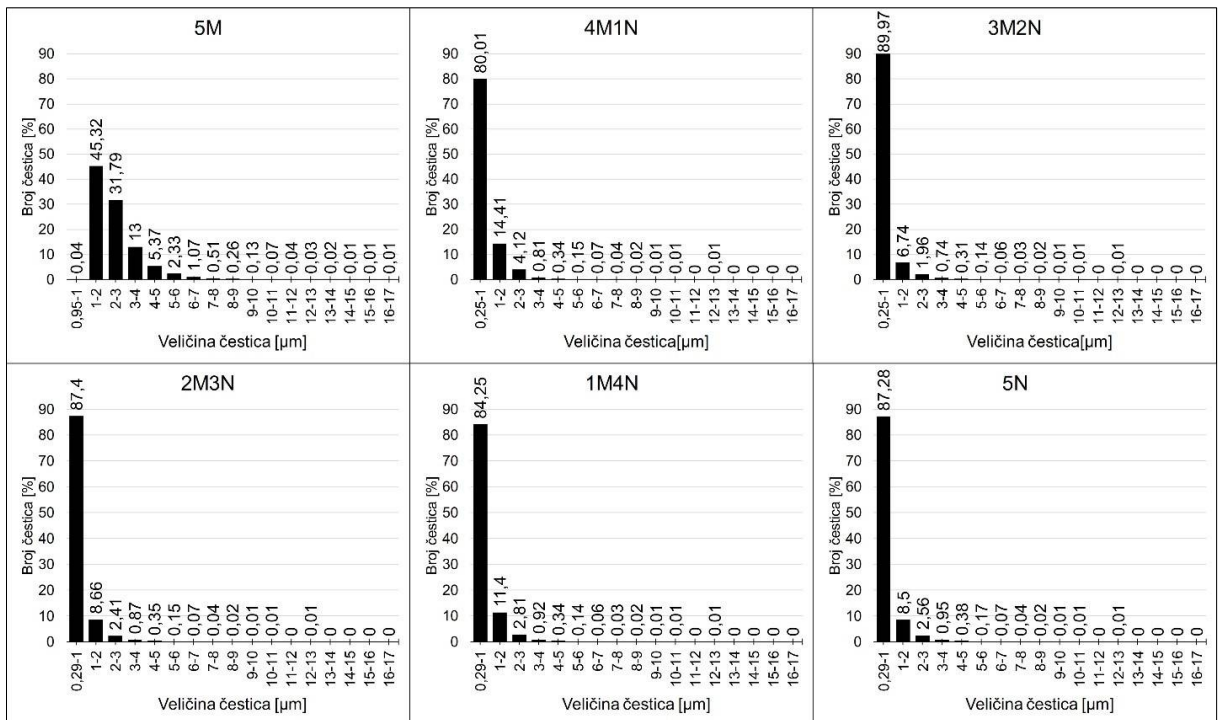
Koriš eno je optere eno od 0,1 kgf (0,9805 N), a rastojanje između otisaka iznosilo je 0,5 mm.



Slika 3.13 Šema merenja mikrotvrdo e

3.1.3.1 Rezultati ispitivanja raspodele estica u aktivnom premazu

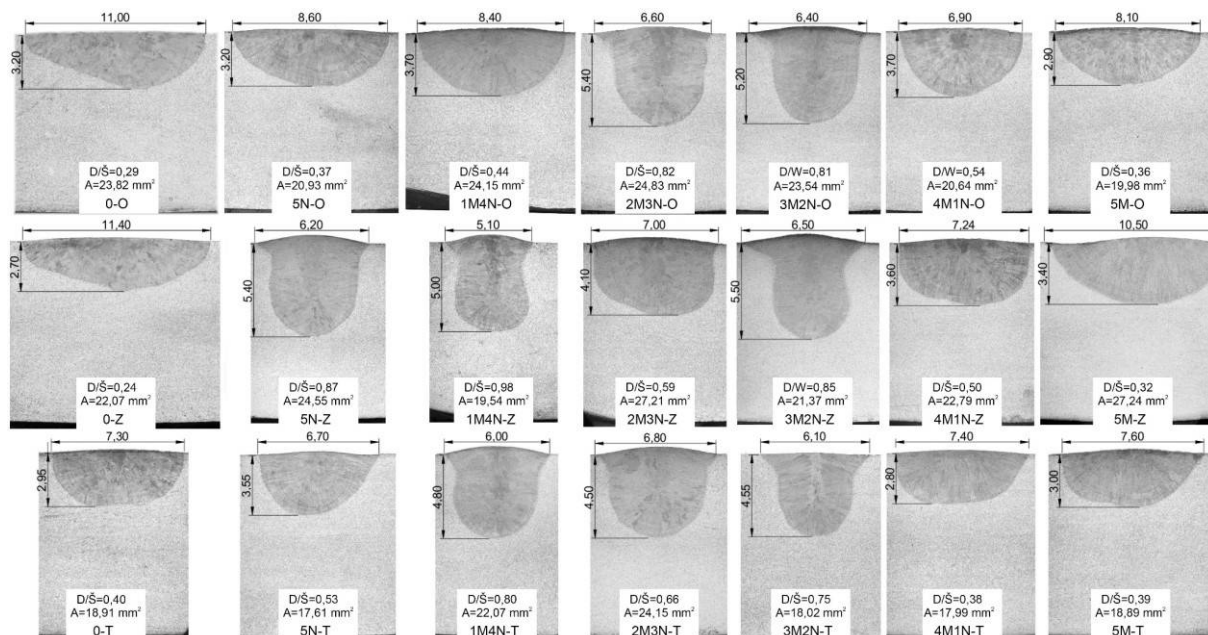
Raspodela veličina estica prema broju estica određena na uređaju Malvern ZetaSizer Nano ZS (merni opseg od 0,3 nm do 10 μm) data je na slici 3.14. Može se uočiti da su detektovane estice daleko veće od nominalne vrednosti estica, odnosno da je došlo do aglomeracije estica. Najmanje detektovane estice su bile 0,25 μm , dok su najveće bile do 17 μm . Najveći broj estica je do veličine 1 μm , osim kod aktivnog premaza sa 5% 300 nm TiO_2 estica. Najmanje estice uočene su u mešavinama submikronskih i nano estica 4M1N i 3M2N veličine 0,25 μm , dok su kod 2M3N, 1M4N i 5N najmanje estice bile 0,29 μm . Na osnovu rezultata uočena je velika aglomeracija estica, takođe da su najmanje estice postignute u mešavinama submikronskih i nano estica TiO_2 . Naime, estice koje u estvuju u pripremi premaza su submikronskih i nano veličina, međutim između njih deluju sekundarne molekulske sile (Van der Waals-ove sile) prilikom kojih dolazi do njihovog međusobnog vezivanja, odnosno aglomeracije.



Slika 3.14 Raspodela estica po veli ini i broju u aktivnim premazima

3.1.3.2 Rezultati ispitivanja makrostrukture

Na slici 3.15 prikazani su makro preseki dobijenih uzoraka nakon metalografske pripreme, gde se vide oblik i dimenzije metala šava. Kod uzoraka koji su pretopljeni bez upotrebe aktivnog premaza uo lijev je plitak i širok šav. Uzorci koji su pretopljeni sa aktivnim premazom, odnosno A-TIG postupkom imaju uži šav i ve u dubinu uvara, me utim ona se razlikuje u zavisnosti od udela mikro i nano estica. Na osnovu dubina uvara, može se konstatovati da ve u dubinu uvara imaju uzorci pretopljeni premazom sa mešavinom mikro i nano estica u odnosu na premaze sa samo jedom vrstom estica.



Slika 3.15 Makro prikaz uzoraka nakon nagrizanja (SM)

Nakon izmerenih dimenzija metala šava, u programu ImageJ izvršeno je merenje površine metala šava. U tabeli 3.2 su prikazane srednje vrednosti dobijenih rezultata uzoraka pretopljenih A-TIG postupkom.

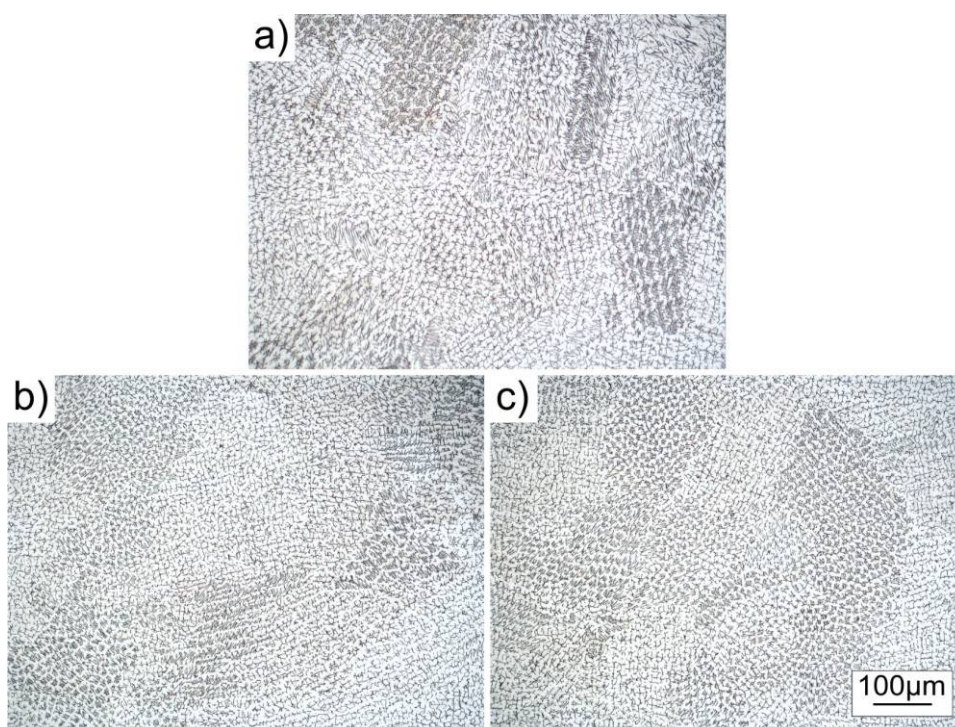
Tabela 3.2 Srednje vrednosti dubine uvara, širine metala šava, odnosa dubine i širine (D/Š) i površine metala šava kod uzoraka sa aktivnim premazom

Oblik vrha elektrode	Srednja vrednost širina metala šava [mm]	Srednja vrednost dubina metala šava [mm]	Srednja vrednost odnosa D/Š	Srednja vrednost površine metala šava [mm ²]
Oštra 90°(O)	7,5	4,02	0,53	22,3
Zatupljena 90° sa pre nikom na vrhu 0,5 mm (Z)	7,2	4,75	0,66	23,8
Tupa 180° (T)	6,8	3,87	0,57	19,8

Sa slike 3.15 vidi se da je najveća dubina metala šava od 5,5 mm postignuta sa zatupljenom elektrodom i premazom 3M2N, dok je najbolji odnos D/Š, kao i najuži metal šav je postignut sa zatupljenom elektrodom kod uzorka 1M4N. Sa elektrodom sa tupim vrhom (tabela 3.2.) u proseku je dobijena najuža vrednost širine šava, ali sa najmanjom vrednošću u dubine uvara, kao i površine rastopljenog metala šava. Na osnovu toga može se konstatovati da su najniže vrednosti rezultata postignuti sa tupom elektrodom. Ako se posmatraju premazi zasnovani na mešavinama estica tu su rezultati postignuti sa oštrom i zatupljena elektrodom slični, izuzev 1M4N gde se zatupljena elektroda pokazala mnogo boljim izborom (slika 3.15). Iako su rezultati nešto bolji kod zatupljene elektrode, ova elektroda ima jedan značajan nedostatak - prilikom oštrenja elektrode veoma je teško postići konzistentno zatupljenje od 0,5 mm na vrhu elektrode, jer su aparati za oštrenje konstruisani da oštrem elektrodu u obliku konusa.

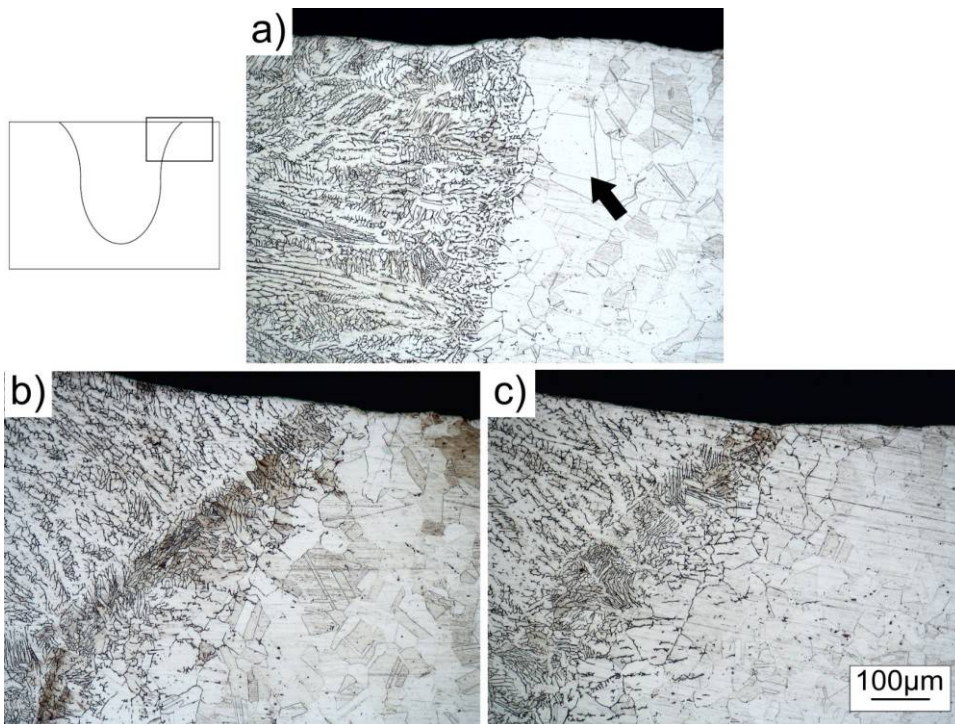
3.1.3.3 Rezultati ispitivanja mikrostrukture

Da bi se prikazale uo ene promene u mikrostrukтури odabrano je nekoliko reprezentativnih uzoraka, slike 3.16 do 3.18. Svi odabrani uzorci su pretopljeni zatupljenom elektrodom. Me u odabranim uzorcima je uzorak pretopljen bez aktivnog premaza (0-Z), uzorak pretopljen sa premazom od mikro estica TiO_2 (5M-Z) i nano estica TiO_2 (5N-Z), kao i uzorak sa najužom širinom šava, odnosno najvećim odnosom D/Š (1M4N-Z). Mikrostruktura metala šava uzoraka 0-Z, 1M4N-Z i 5N-Z prikazana je na slici 3.16. Na uzorcima je uo ljliva dendriška mikrostruktura koja je karakteristična za metal šava neraju ih elika, me utim kod uzorka 0-Z (3.16a) struktura je krupnija u odnosu na uzorke pretopljene A-TIG postupkom (3.16b,c).

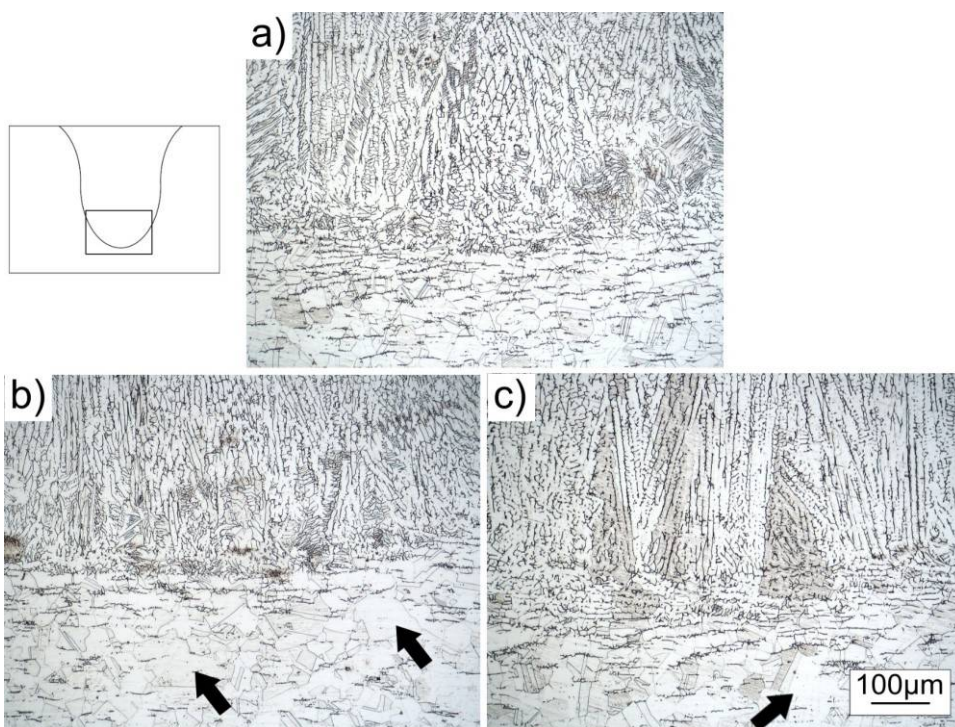


Slika 3.16 Mikrostruktura metala šava: a) uzorak 0-Z, b) uzorak 1M4N-Z, c) uzorak 5N-Z (SM)

Na slikama 3.17 i 3.18 prikazane su mikrostrukture u zoni linije stapanja, gde je na slici 3.17 prikazana mikrostruktura koja se nalazi uz gornju površinu osnovnog materijala, dok je na slici 3.18 mikrostruktura linije stapanja ispod korena metala šava. Na prikazanim slikama se jasno može uo iti razlika između uzorka bez aktivnog premaza i uzorka sa aktivnim premazom. Uz gornju površinu kod uzorka bez aktivnog premaza velika austenitna zrna je veća zbog dužeg izlaganja toploti (slika 3.17a), dok kod uzorka sa aktivnim premazom porast austenitnog zrna je uo ljliv ispod metala šava (slika 3.18b,c), što pokazuje da je veća količina toplote usmerena ka donjoj strani uzorka.



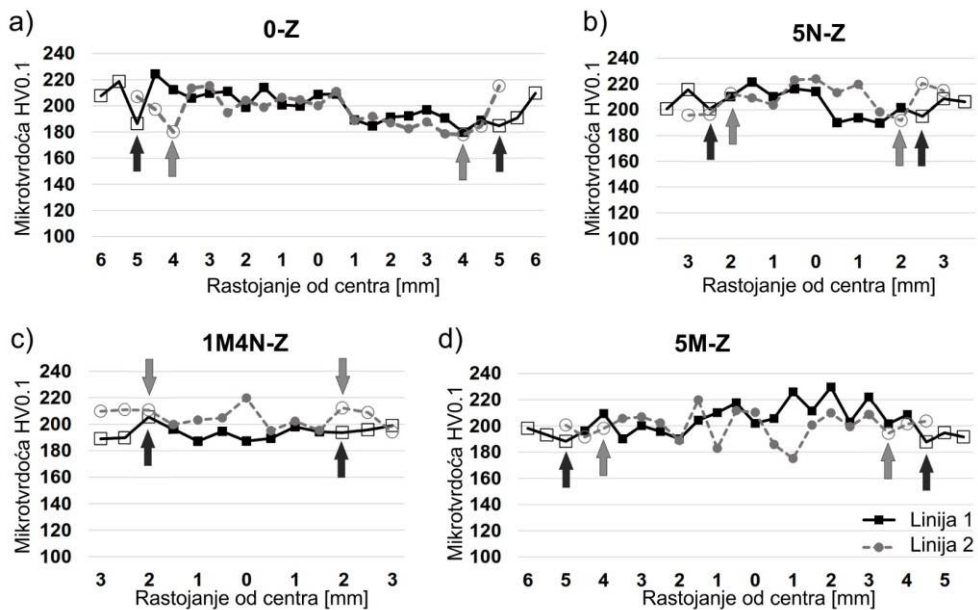
Slika 3.17 Mikrostruktura linije stapanja metala šava uz površinu: a) uzorak 0-Z, b) uzorak 1M4N-Z, c) uzorak 5N-Z (SM)



Slika 3.18 Mikrostruktura linije stapanja ispod metala šava: a) uzorak 0-Z, b) uzorak 1M4N-Z, c) uzorak 5M-Z (SM)

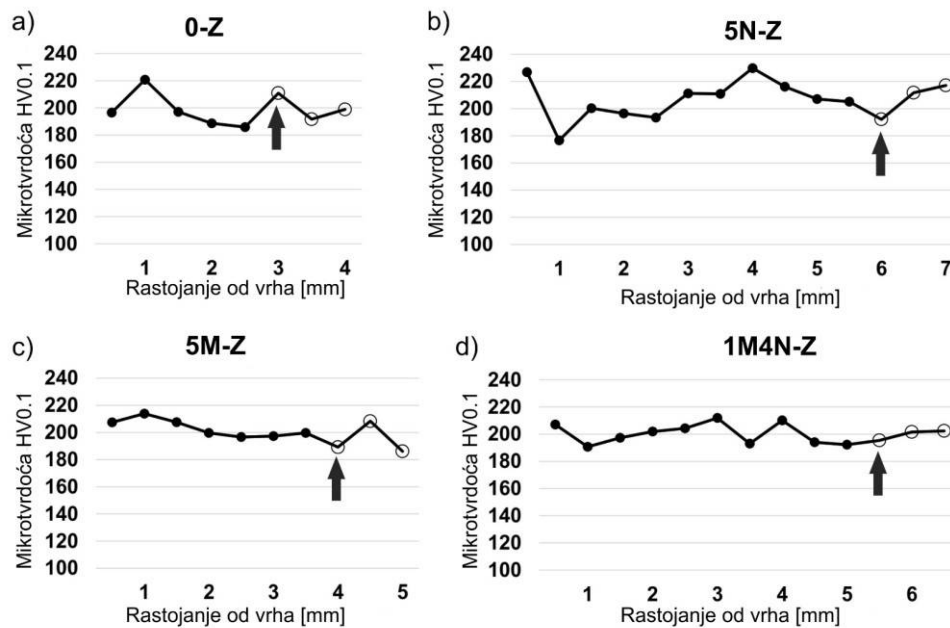
3.1.3.4 Rezultati ispitivanja mikrotvrdo e

Ispitivanje mikrotvrdo e je izvršeno na istim reprezentativnim uzorcima kao i ispitivanje mikrostrukture: 0-Z, 5M-Z, 5N-Z i 1M4N. Na slici 3.19 prikazani su dijagrami raspodele mikrotvrdo e, odnosno vrednosti mikrotvrdo e duž linije 1 i linije 2 (slika 3.13), dok su na slici 3.20 prikazane vrednosti tvrdo e duž linije 3 (slika 3.13). Na prikazanim dijagramima crnim ta kama je predstavljena mikrotvrdo a u metalu šava, dok je belim prikazana vrednost mikrotvrdo e u osnovnom materijalu uzorka. Strelicom je prikazana vrednost na liniji stapanja metala šava.



Slika 3.19 Raspodela mikrotvrdo e duž linija 1 i 2 uzorka: a) 0-Z, b) 5N-Z, c) 1M4N-Z, d) 5M-Z

Vrednost mikrotvrdo e kod uzorka 0-Z bez aktivnog premaza je najniža u blizini linije stapanja uz površinu uzorka (prikazano strelicama na slici 3.19a). sa druge strane, kod uzoraka koji su pretopljeni sa aktivnim premazom (5N-Z, 1M4N-Z i 5M-Z) najmanje vrednosti mikrotvrdo e su dobijene ispod metala šava, kao što je prikazano na slici 3.19b,c,d. Vrednosti mikrotvrdo e odgovaraju vrednostima veli ine austenitnih zrna u mikrostrukтури u datim oblastima (slika 3.17 i 3.18).



Slika 3.20 Raspodela mikrotvrdoće kroz sredinu metala šava od površine uzorka ka korenu:
a) 0-Z, b) 5N-Z, c) 5M-Z, d) 1M4N-Z

Na slici 3.20 prikazana je mikrotvrdoća u sredini metala šava od površine uzorka ka korenu metala šava.

3.1.4 Ekspiriment IV – Određivanje uticaja nanoestica SiO_2 i tipa rastvarača

Naredni eksperiment je urađen sa parametrima koji su odabrani kao rezultati prethodnih eksperimenata. Korišena je elektroda prenika 2,4 mm sa oštrim, konusnim vrhom ugla 90° . Korišeni je aparat EWM Tetrix 300 sa jačinom struje od 200 A, protokom gasa od 12 l/min i mlaznicom 12,7 mm. Rastojanje vrha elektrode od uzorka je 1 mm, a brzina kretanja elektrode 100 mm/min. Međutim aktivni premaz je pripremljen sa drugom vrstom estica, umesto TiO_2 korišene su nanoestice SiO_2 veličine 40 nm. Aktivni premaz je pripremljen sa acetonom, ali i sa etanolom. U eksperimentu II je ustanovljeno da se aceton pokazao za nijansu bolje od etanola, međutim problem je što aceton isparava brže i dolazi do promene odnosa udela estica, odnosno povećanja koncentracije aktivne supstance nakon isparavanja rastvarača.

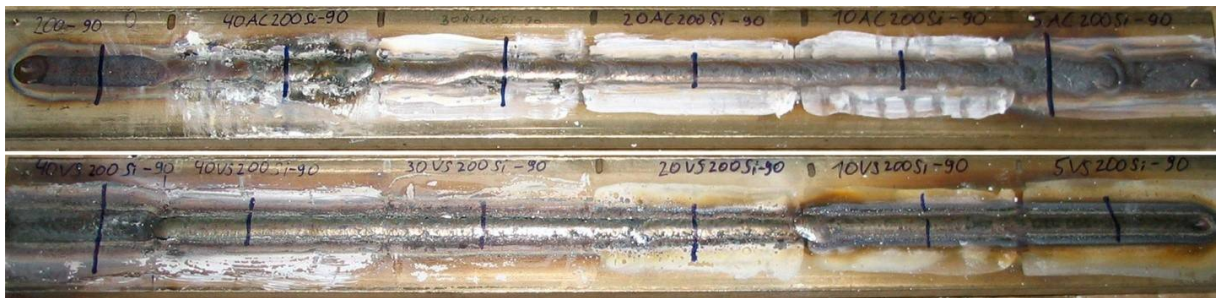
U prethodnim eksperimentima konstatovano je da procenat od 5% estica TiO_2 daje najbolje rezultate kod dubine uvara. U ovom eksperimentu pripremljeni su aktivni premazi sa nanoesticama SiO_2 udela 40%, 30%, 20%, 10% i 5% u acetonu i etanolu. Pretapanje je urađeno na dve plohe neravnog elika AISI 304L dimenzija 300 x 40 x 8 mm. Obe plohe su podeljene u oblasti od po 50 mm, svaka oblast je korišena za drugu vrstu aktivnog premaza. Na prvoj plohi korišćen je premaz na bazi acetona, dok je na drugoj korišćen premaz na bazi etanola (slika 3.21).

Oštra 90° →	0	40% AC	30% AC	20% AC	10% AC	5% AC
Oštra 90° →		40% ET	30% ET	20% ET	10% ET	5% ET

Slika 3.21 Šema pretapanja

Prva oblast na uzorku je pretopljena bez premaza, „nulti“ uzorak, kako bi se uoio uticaj premaza. Nakon toga je na narednu oblast etkicom nanešen premaz sa 40% nano estica SiO₂, zatim redom 30%, 20%, 10% i na kraju premaz sa 5% estica SiO₂.

Na slici 3.22 prikazani su izgledi pretopljenih ploa, sa tragovima preostalog aktivnog premaza, i markerom obeleženim mestima za seenje i pripremu uzoraka.



Slika 3.22 Izgled pretopljenih ploa

Isecanje uzoraka iz ploa je vršeno brusilicom, nakon toga je priprema uzoraka uraena po standardnoj metalografskoj proceduri na opremi Struers. Nakon poliranja nagrizanje je izvršeno carska voda potom je uraeno makro ispitivanje, merenje dimenzija metala šava, odnosno dubine uvara.

3.1.4.1 Rezultati ispitivanja makrostrukture

Dimenzije metala šava su izmerene na svetlosnom mikroskopu, dobijene vrednosti za uzorke sa aktivnim premazom prikazane su u tabeli 3.3. Nulti uzorak, odnosno uzorak bez premaza imao je dubinu uvara od 2,1 mm, dok je širina metala šava bila 9,1 mm (slika 3.23).

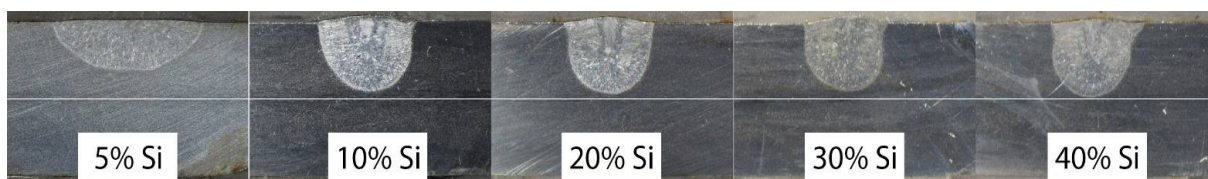


Slika 3.23 Makro izgled metala šava nakon pretapanja uzorka bez premaza

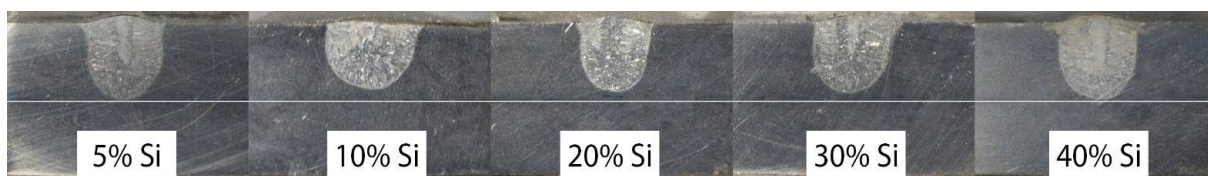
Na slikama 3.24 i 3.25 prikazani su oblici šavova dobijeni upotrebom aktivnog premaza, a i iz tabele 3.3, vidi se je da je veća dubina postignuta sa premazom gde je rastvarač etanol, osim u slučaju sa 20% nano estica SiO_2 .

Tabela 3.3 Izmerene vrednosti metala šava sa aktivnim premazom

Rastvarač		5%	10%	20%	30%	40%
Aceton	Dubina [mm]	3,2	4,5	4,6	4,5	4,8
	Širina [mm]	11,6	7,8	6,2	6	6,3
Etanol	Dubina [mm]	5,1	4,9	4,5	4,7	5
	Širina [mm]	6	6,4	5,6	6,3	6



Slika 3.24 Izgled metala šava nakon pretapanja uzorka sa aktivnim premazom na bazi acetona



Slika 3.25 Izgled metala šava nakon pretapanja uzorka sa aktivnim premazom na bazi etanola

Najveća postignuta dubina uvara je kod uzorka sa 5% estica SiO_2 i iznosi 5,1 mm, međutim kod uzorka sa 40% nano estica u etanolu dubina je 5 mm. Kod uzorka sa aktivnim premazom na bazi acetona najveća dubina uvara iznosi 4,8 mm sa 40% nano estica. Da bi se odredili parametri sa kojima je postignut najpovoljniji oblik šava u ovom eksperimentu izraunat je odnos D/Š koji je prikazan u tabeli 3.4.

Tabela 3.4 Odnos D/Š kod oblika šava uzoraka zavarenih bez i sa aktivnim premazom.

	Bez premaza	Udeo nano estica SiO_2					Rastvarač
		5%	10%	20%	30%	40%	
D/Š	0,23	0,28	0,58	0,74	0,75	0,76	Aceton
		0,85	0,77	0,80	0,75	0,83	Etanol

Najniža vrednost odnosa D/Š je kod uzorka bez aktivnog premaza, dok je najveća vrednost 0,85 dobijena kod uzorka sa 5% nano estica SiO₂ rastvorenih u etanolu. Prema vrednostima u tabelama 3.3 i 3.4 može se zaključiti da su uzorci sa 40% estica u oba rastvarača veoma blizu najvećih postignutih vrednosti i da bi možda premazi sa većim procentualnim udelom estica imali više efekta na dubinu uvara. Međutim, prilikom pripreme aktivnog premaza sa tolikom količinom estica dolazi do formiranja paste koju je teško nanositi na uzorak. Pored toga, aktivni premaz bi bio višestruko skuplji za proizvodnju u odnosu na 5% nano estica veličine 40 nm SiO₂.

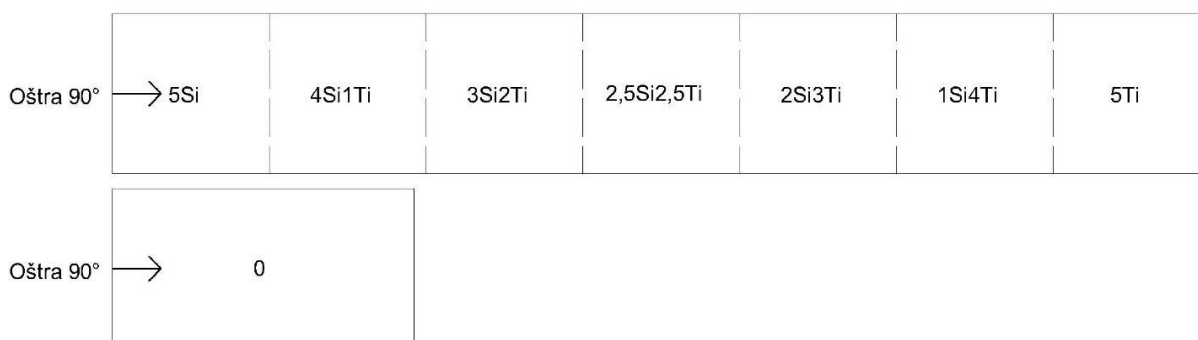
3.1.5 Eksperiment V – Određivanje uticaja udela nano estica TiO₂ i SiO₂

Na osnovu dobijenih rezultata upotrebom aktivnog premaza na bazi nano estica TiO₂ veličine 20 nm i aktivnog premaza na bazi SiO₂ veličine 40 nm, u ovom eksperimentu izvršeno je ispitivanje njihovih mešavina u etanolu. Aktivni premaz je napravljen tako da ukupan maseni udeo estica iznosi 5% u suspenziji, napravljene su kombinacije:

- 5% Nano estica SiO₂ (5Si)
- 4% Nano estica SiO₂ + 1% Nano estica TiO₂ (4Si1Ti)
- 3% Nano estica SiO₂ + 2% Nano estica TiO₂ (3Si2Ti)
- 2,5% Nano estica SiO₂ + 2,5% Nano estica TiO₂ (2,5Si2,5Ti)
- 2% Nano estica SiO₂ + 3% Nano estica TiO₂ (2Si3Ti)
- 1% Nano estica SiO₂ + 4% Nano estica TiO₂ (1Si4Ti)
- 5% Nano estica TiO₂ (5Ti).

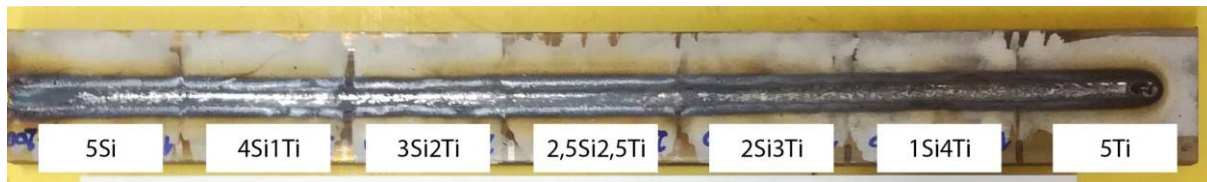
Odmeravanje udela je urađeno na tehnici koj vagi RadWag PS 2100/c/2 tako što je u posudu prvo dodat etanol, a potom su dodate estice u masenom udelu od 5%, pri čemu je ukupna masa suspenzije iznosila 4g. Nakon mešanja komponenti homogenizacija je urađena na elektromagnetom mešaču. Po završetku postupka homogenizacije iz posuda je odvojena polovina suspenzije kako bi se na uređaju ZetaSizer ispitala veličina estica u suspenziji zbog pojave aglomerata.

Proces pretapanja izvršen je na dve ploče od kojih je jedna ploča dužine 350 mm, širine 50 mm i debljine 10 mm, i druga ploča 100 x 50 x 10 mm, koja je korišćena za nulti uzorak (0) pretopljen bez premaza. Ploče su podeljene na oblasti dužine 50mm i na svaku oblast je nanešen drugačiji aktivni premaz, kao što je prikazano na slici 3.26.



Slika 3.26 Šema pretapanja

Pretapanje je izvršeno na aparatu EWM Tetrix 300 sa jačinom struje od 200 A, elektroda je prenik 2,4 mm od legure volframa sa 2% torijum oksida sa oštrim vrhom ugla 90°. Prenik mlaznice oko elektrode je 12,7mm, rastojanje vrha elektrode od mlaznice je 9 mm, dok je elektroda od uzorka udaljena 1 mm. Uzorci su postavljeni na radni sto, a traktor za zavarivanje je podešen tako da se gorionik kreće po sredini ploče. Brzina pretapanja je iznosila 100 mm/min.

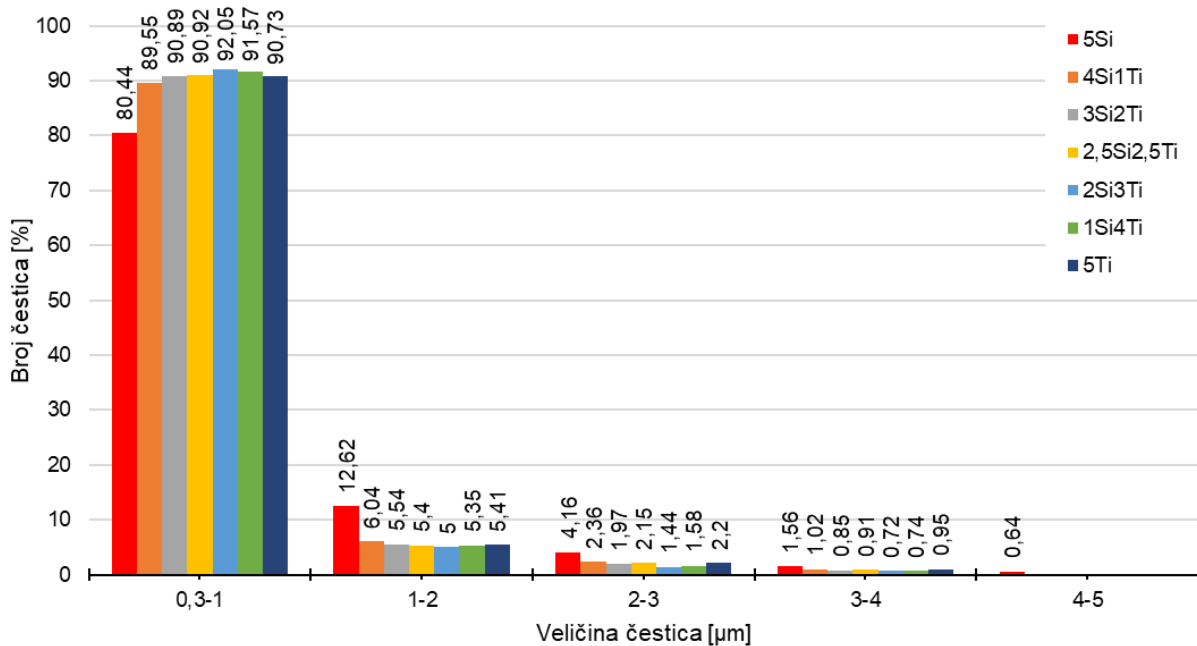


Slika 3.27 Izgled pretopljene ploče sa aktivnim premazima

Nakon pretapanja (slika 3.27) je iz svake oblasti isecen uzorak, ugaonom brusilicom, a potom je pripremljen standardnom metalografskom pripremom. Nakon nagrizanja uzorci su ispitani na svetlosnom mikroskopu kako bi se izmerile dimenzije metalna šava i uočili nedostaci u metalu šava ukoliko su prisutni. Pored makrostrukture, ispitana je i mikrostruktura, kao i merenje mikrotvrdoće u tri linije.

3.1.5.1 Rezultati ispitivanja raspodele čestica u aktivnom premazu

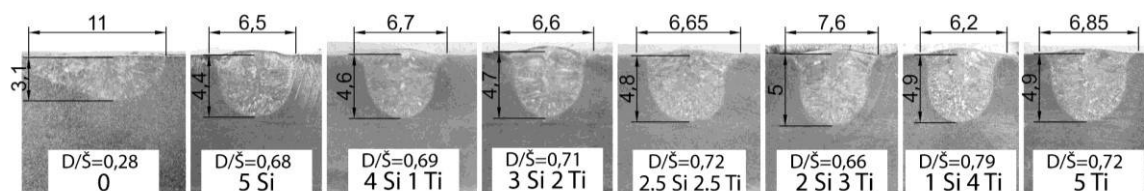
Veličine čestice koje su u sastavu aktivnog premaza su SiO_2 40 nm i TiO_2 20 nm, međutim zbog dejstva sekundarnih sila one su u obliku aglomerata veće njihove dimenzije. Nakon pripreme aktivnog premaza deo je ispitan na Zetasizer Nano ZS. Ustanovljeno je da su najmanje čestice veličine 0,3 μm , odnosno 300 nm, što je skoro deset puta veće od nazivne veličine čestica. Na slici 3.28 može se videti odnos količinskog broja udela čestica u sastavu premaza. Veličina detektovanih čestica je do 17 μm , međutim preko 95% čestica se nalazi u opsegu do 5 μm . Najmanjih čestica od 0,3 do 1 μm , na osnovu broja čestica ima najviše u suspenziji 2% SiO_2 i 3% TiO_2 i to je 92,05% od ukupnog broja detektovanih čestica. Aktivni premaz sa 1% SiO_2 i 4% TiO_2 najsitnijih čestica ima 91,57% od ukupnog broja čestica. Najveći udeo u aktivnom premazu čestice veličine od 1 do 10 μm , dok najveće pronađene čestice prelaze veličinu od 100 μm .



Slika 3.28 Raspodela čestica po veličini i udelu u aktivnom premazu

3.1.5.2 Rezultati ispitivanja makrostrukture

Nakon metalografske pripreme, uzorci su fotografisani makro, a na svetlosnom mikroskopu su izmerene dubine i širine metala šava, koje su prikazane na slici 3.29.

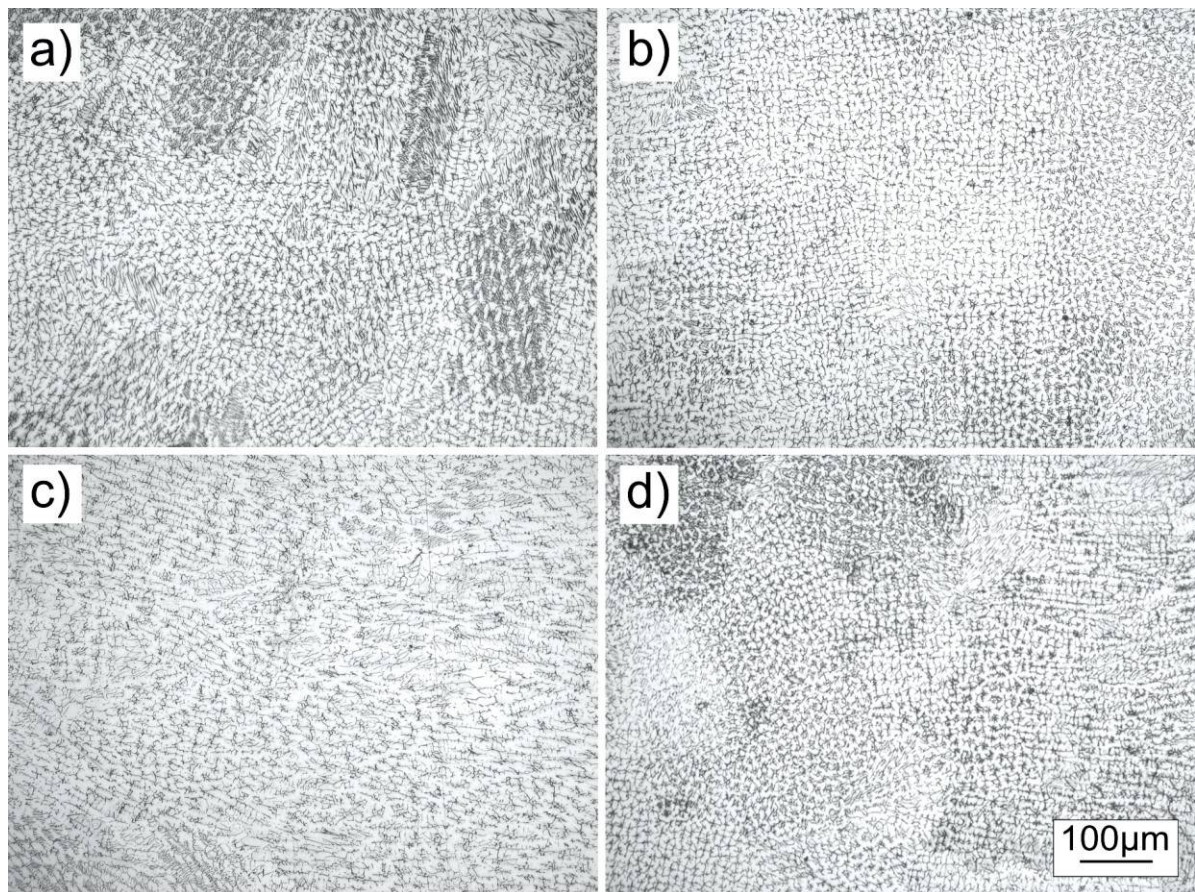


Slika 3.29 Makro prikaz uzoraka nakon nagrizanja sa dimenzijama metala šava (SM)

Sa slike 3.29 se vidi da je najmanja dubina uvara postignuta kod uzorka bez premaza, dok kod uzorka sa aktivnim premazom postignuta dubina uvara je veća za više od 40%. Najveća dubina od 5 mm je postignuta kod mešavine premaza od 2% SiO₂ i 3% TiO₂, a sledeći po dubini uvara od 4,9 mm su uzorci sa premazom sa 1% SiO₂ i 4% TiO₂ i premazom sa 5% TiO₂.

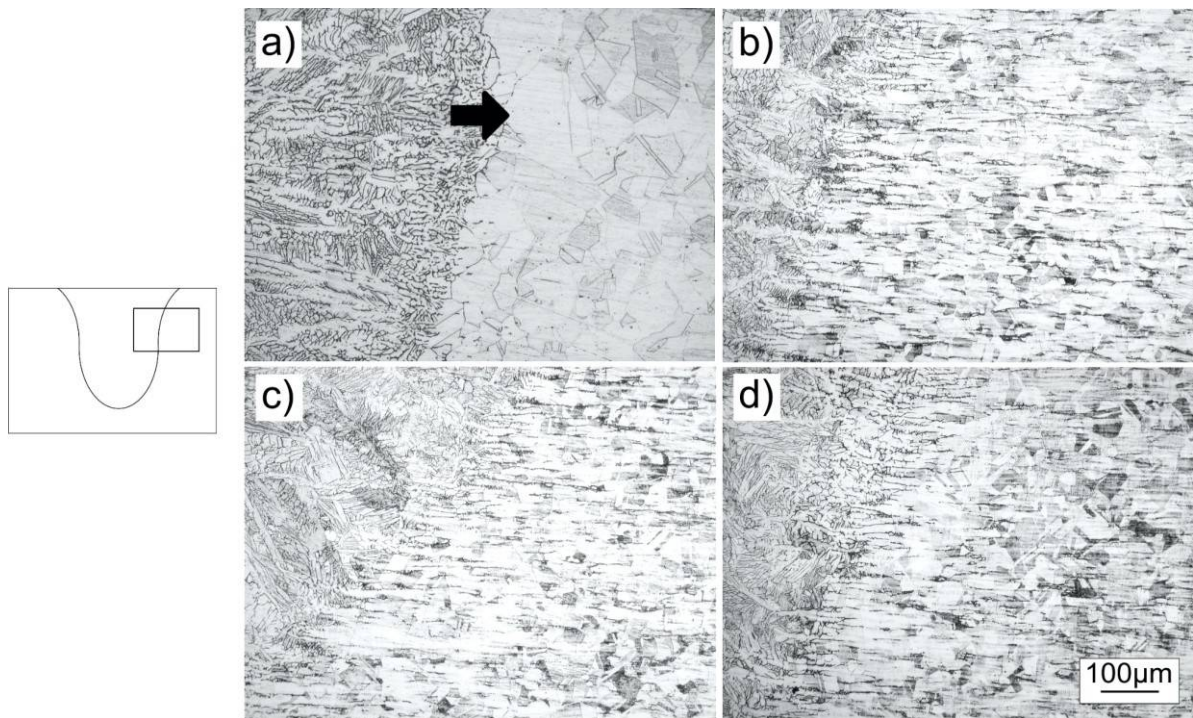
3.1.5.3 Rezultati ispitivanja mikrostrukture

Ispitivanje mikrostrukture je urađeno u oblastima metala šava i linije stapanja. Na slici 3.30 prikazan je izgled metala šava kod uzorka bez premaza (a), i sa premazima 4Si1Ti (b), 3Si2Ti (b) i 5Ti (d).

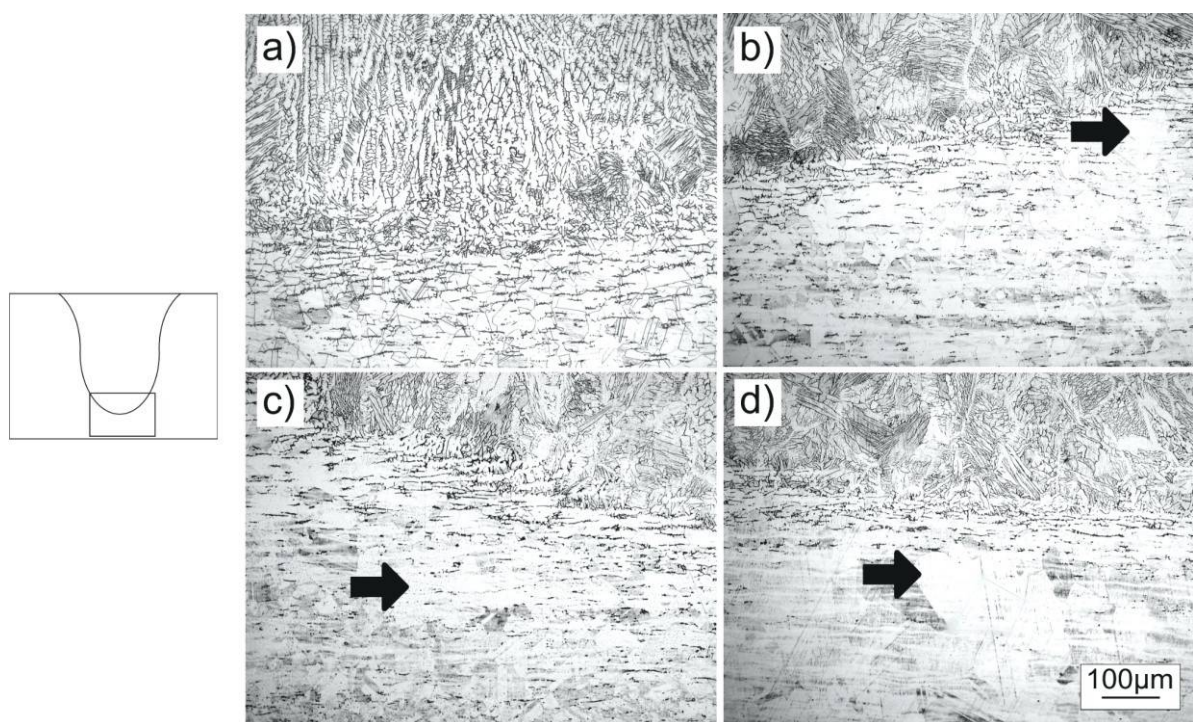


Slika 3.30 Mikrostruktura metala šava: a) bez premaza, b) 4Si1Ti, c) 3Si2Ti d) 5Ti (SM)

Na slici 3.30 vidljiva je tipična dendrična struktura karakteristična za metal šava. Na slici se može uočiti da postoji veća razlika u mikrostrukturi, ali to je posljedica različite orijentacije dendrita. Slika 3.31 predstavlja oblast zone uticaja toplote uz površinu uzorka, gdje se mogu uočiti da su poligonalna zrna austenita veća kod uzorka bez upotrebe premaza slika 3.31a.



Slika 3.31 Mikrostruktura uz površinu uzorka u zoni ZUT-a: a) 0, b) 5Ti c) 1Si4Ti d) 2Si3Ti (SM)



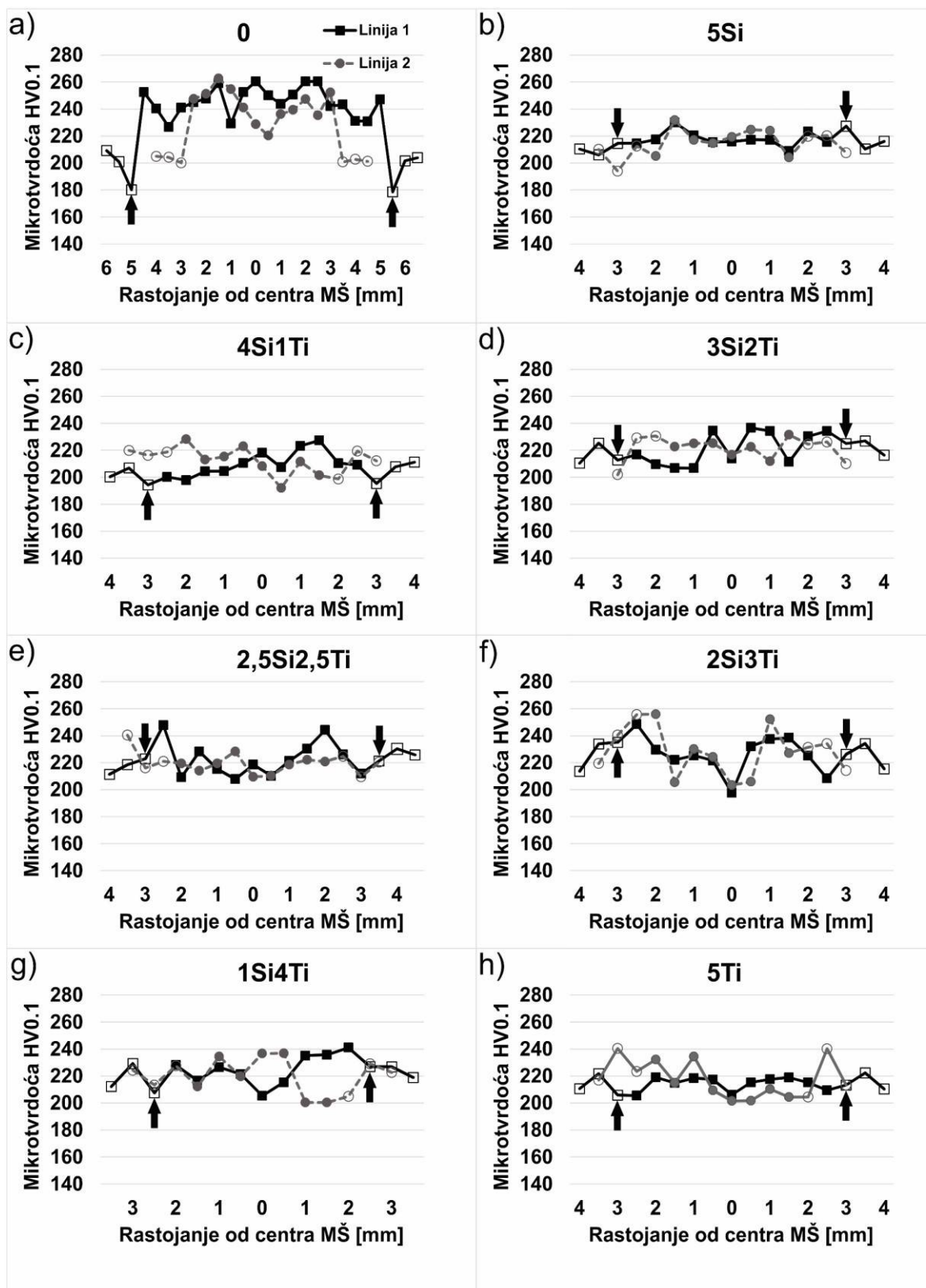
Slika 3.32 Mikrostruktura ispod metala šava u zoni ZUT-a: a) 0, b) 5Ti c) 4Si1Ti d) 2,5Si2,5Ti (SM)

Mikrostruktura ispod metala šava je prikazana na slici 3.32, gde se može uo iti da u oblasti ZUT-a ispod metala šava kod uzoraka sa upotrebom aktivnog premaza (slika 3.32b,c,d) prisutna su ve a poligonalna austenitna zrna.

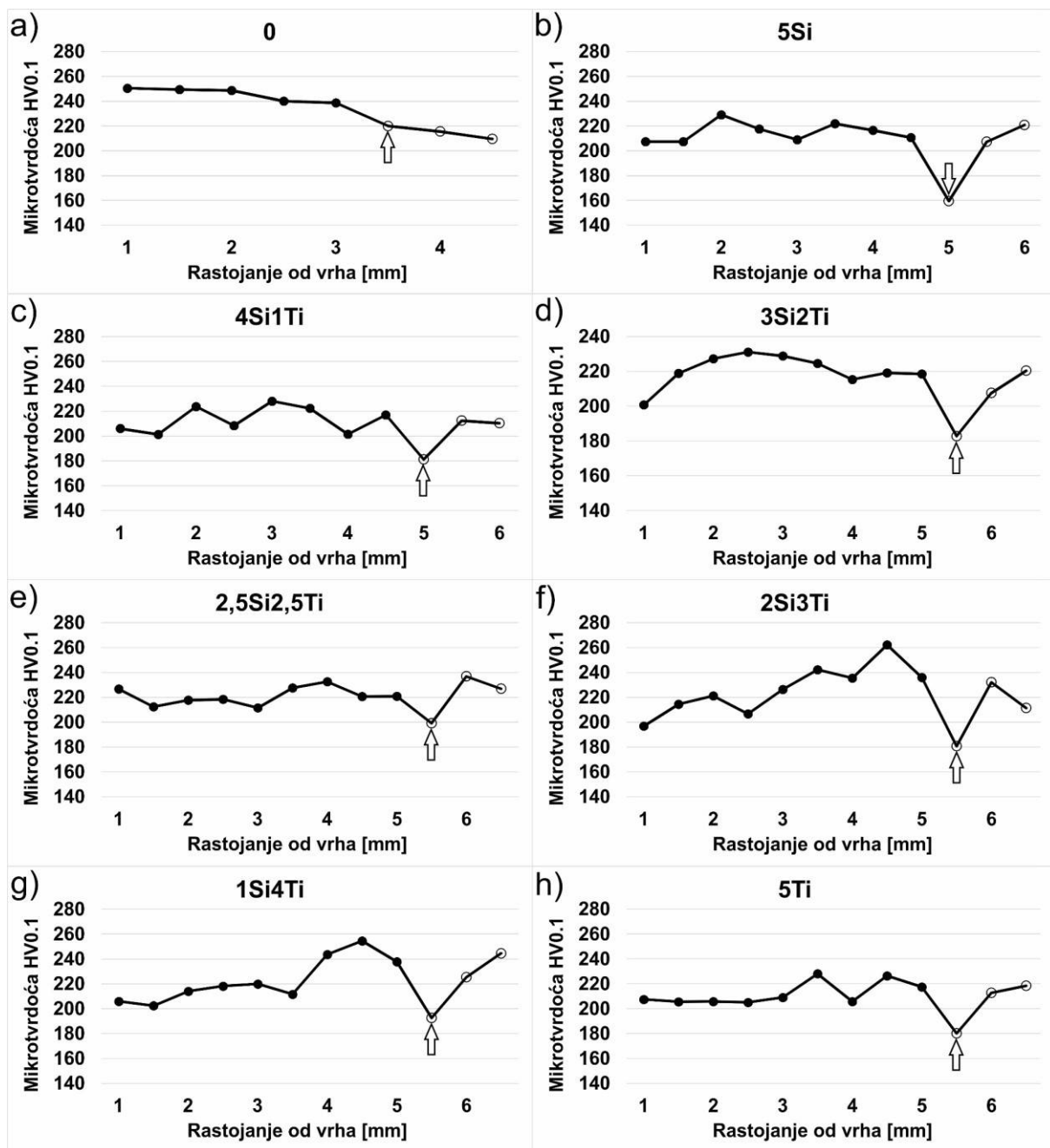
3.1.5.4 Rezultati ispitivanja mikrotvrdo e

Ispitivanje mikrotvrdo e je izvedeno na aparatu Tukon 1102 sa optere enjem od 0,1 kgf poštuju i rastojanje između otisaka od trostruke vrednosti dijagonale otiska. Mikrotvrdo a je merena u metalu šava, ZUT-u i osnovnom materijalu sa obe strane metala šava. Merenja su ura ena u tri linije (slika 3.13), prva linija je 1 mm ispod gornje ivice uzorka, druga linija je 1 mm iznad donje linije metala šava i tre a linija je vertikalna kroz sredinu metala šava.

Raspodela mikrotvrdo e prikazana ja na slikama 3.33 i 3.34 u vidu dijagrama za svaki uzorak. Sa dijagrama jasno se vidi da kod uzorka pretopljenog bez upotrebe aktivnog premaza mikrotvrdo a se smanjuje na granici metala šava uz gornju ivicu uzorka (slika 3.33a, pokazano crnim strelicama), odnosno da metal šava ima ve u tvrdo u od osnovnog materijala. Kod uzoraka gde je upotrebljen aktivni premaz do smanjenja tvrdo e tako e dolazi na granicama metala šava oko korena metala šava (slika 3.33b-h, prikazano crnim strelicama). Treba naglasiti da vrednost mikrotvrdo e u metalu šava odgovara tvrdo i u osnovnom materijalu. Na slici 3.34, tako e se može uo iti (prikazano belim strelicama) da do smanjenja tvrdo e dolazi oko korena metala šava.



Slika 3.33 Raspodela mikrotvrdo e duž linija 1 i 2

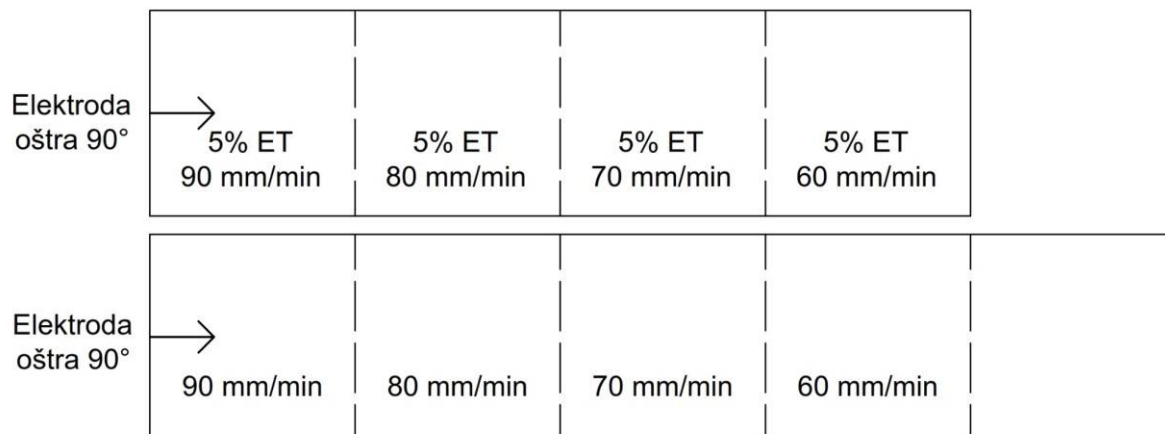


Slika 3.34 Raspodela mikrotvrdo e duž linije 3

3.1.6 Eksperiment VI – Odre ivanje uticaja brzine pretapanja

Ovaj eksperiment je izveden sa nano esticama SiO₂ rastvorenim u etanolu sa udelom od 5% estica SiO₂. Eksperiment je izveden sa istim parametrima kao i eksperiment IV uz promenu brzine pretapanja. Ja ina struje iznosi 200A, elektroda pre nika 2,4 mm oštra sa vrhom od 90°, kao zaštitni gas je koriš en argon sa protokom od 12 l/min i rastojanjem vrha elektrode od materijala je 1 mm. Pretapanje je ura eno na dve plo e elika AISI 304L, dimenzija prve plo e je 200 x 40 x 10 mm, dok je druga plo a dimenzija 250 x 40 x 10 mm, a obe plo e su podeljene u oblasti od po 50 mm. Pretapanje je zapo eto sa brzinom od 90 mm/min, a nakon 50 mm brzina je

smanjivana za po 10 mm/min do završne brzine od 60 mm/min. Na svakoj ploči se nalaze četiri oblasti kao što je prikazano na slici 3.35. Na prvu ploču je nanešen aktivni premaz na bazi etanola sa 5% nano estica SiO₂, etikicom u širini oko 20 mm, dok na drugu ploču nije nanešen premaz, kako bi se mogao uporediti uticaj premaza i brzine pretapanja na dubinu uvara.



Slika 3.35 Šema pretapanja

Uzorci nakon pretapanja su prikazani na slici 3.36, gde se mogu primetiti tragovi preostalog premaza koji su u blizini metala šava crne boje, dok malo dalje od metala šava vidi se siva boja premaza



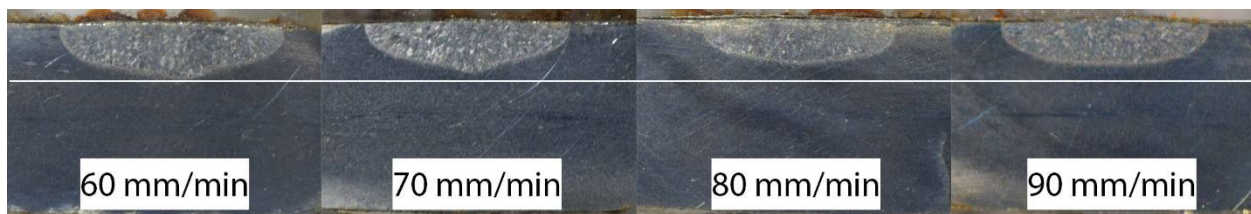
Slika 3.36 Izgled uzoraka nakon pretapanja

Nakon pretapanja izvršeno je presecanje ploče po sredini oblasti ugaonom brusilicom. Iz svake oblasti na mašini Struers Diskotom je isečen novi uzorak na kome je dalje urađena standardna procedura metalografske pripreme, zatapanje uzoraka, brušenje, nagrizanje carskom vodom. Nakon pripreme uzoraka, na svetlosnom mikroskopu izmerene su dimenzije metala šava.

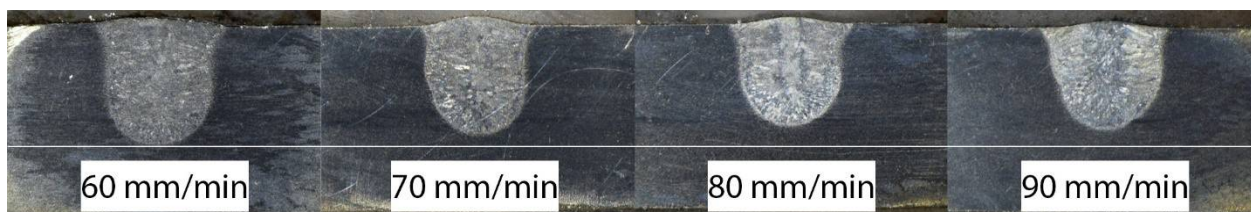
3.1.6.1 Rezultati ispitivanja makrostrukture

Na slici 3.37 prikazane su makrostrukture uzoraka dobijenih različitim brzinama pretapanja bez upotrebe aktivnog premaza, dok uzorci pretopljeni sa upotrebom

aktivnog premaza su prikazani na slici 3.38. Izmerene vrednosti dubine i širine metala šava prikazane su u tabeli 3.5.



Slika 3.37 Izgled metala šava nakon pretapanja uzorka bez aktivnog premaza



Slika 3.38 Izgled metala šava nakon pretapanja uzorka sa aktivnim premazom 5% SiO₂ u etanolu

Sa slika 3.37 i 3.38 kao i iz tabele 3.5 se može konstatovati da se dubina uvara poveća sa smanjenjem brzine pretapanja, kako kod uzorka sa premazom tako i kod uzorka bez premaza. Tako se može videti da se javlja značajna razlika u dubini uvara, tako je dubina uvara kod uzorka sa premazom oko 2,5 puta veća od dubine uvara uzorka bez premaza. Najveća dubina uvara od 6,6 mm postignuta je upotrebom premaza, i brzinom pretapanja od 60 mm/min.

Najbolji odnos D/Š je postignut kod uzorka pri brzini pretapanja od 70 mm/min, na istom uzorku izmeren je i najuži šav od 6,3 mm.

Tabela 3.5 Dubine uvara i širine metala šava nakon pretapanja

Premaz		Brzina pretapanja [mm/min]			
		60	70	80	90
0	Dubina [mm]	2,7	2,6	2,4	2,2
	Širina [mm]	12,1	11,1	10,7	11,4
	Odnos D/Š	0,22	0,23	0,22	0,19
5% SiO ₂	Dubina [mm]	6,6	6	5,6	5,6
	Širina [mm]	7,1	6,3	7,2	7,8
	Odnos D/Š	0,93	0,95	0,78	0,72

3.1.7 Eksperiment VII – Određivanje uticaja ugla vrha elektrode poveća anode pre nika

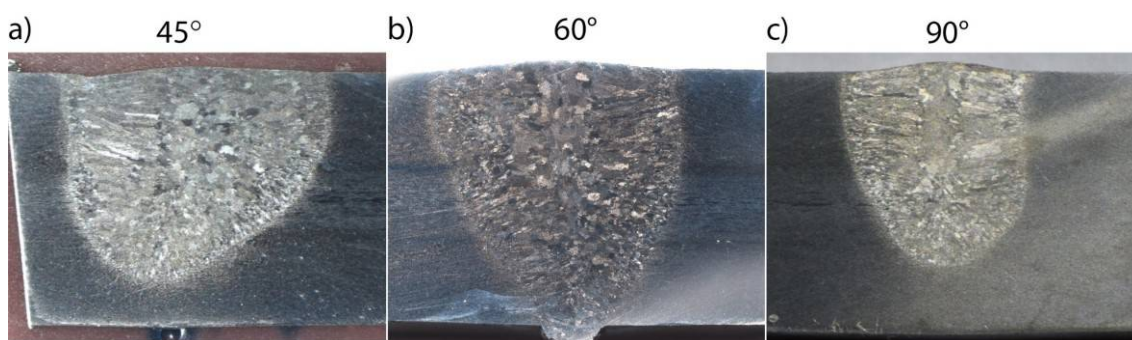
Na osnovu prikupljenih informacija i konstatacija iz prethodnih eksperimenata, sledeći eksperiment pretapanja urađen je sa većom jačinom struje. Jačina struje je povećana na maksimalnu za korišćen aparat za zavarivanje EWM Tetrix 300 i iznosila je 300 A. Na osnovu preporuka proizvođača elektroda za jačinu struje od 300 A potrebno je koristiti elektrodu pre nika 3,2 mm. Sa povećanjem jačine struje, menja se prenik

elektrode, ali je potrebno korigovati ugao vrha elektrode kako bi se mogla obezbediti najveća dubina uvara. U ovom eksperimentu korišćene su elektrode sa uglom vrha 45°, 60° i 90°. Pored povećanja jačine struje, povećana je i debljina ploče za pretapanje pa su sada dimenzije ploče od nerastive legirane elika AISI 304L 125 x 50 x 14 mm. Plan pretapanja prikazan je na slici 3.39, gde se vidi da elektroda prolazi kroz sredinu uzorka. Na uzorke je nanešen aktivni premaz na bazi mešavine čestica 3% TiO₂ i 2% SiO₂.



Slika 3.39 Šema pretapanja

Elektroda je postavljena u gorionik na koji je montirana mlaznica pre nika 12,7 mm, elektroda je imala prepust od 9 mm. Nakon postavljanja ploče na radni sto izvršeno je centriranje putanje pretapanja i podešeno je da elektroda bude na rastojanju od 1 mm od uzorka. Pretapanje je urađeno brzinom od 40 mm/min. Tokom pretapanja ploča i elektrodom sa vrhom od 60° nakon 90 mm od početka došlo je do pojave prokapljine, odnosno rastopljen materijal je procureo ka radnoj ploči. Nakon što su se pretopljeni uzorci ohladili izvršeno je sečenje uzoraka za dalju metalografsku pripremu.



Slika 3.40 Izgled metala šava nakon pretapanja uzorka sa aktivnim premazom mešavine 3% TiO₂ i 2% SiO₂ u etanolu i uglom vrha elektrode: a) 45°, b) 60° c) 90°

Na slici 3.40 jasno se vidi da je kod uzorka pretopljenog sa elektrodom vrha 60° postignut kompletan provar ploče od 14 mm. Sa slike se vidi da je uzorak pretopljen sa elektrodom ugla vrha 45° imao veću dubinu uvara u odnosu na uzorak pretopljen

elektrodom iji je ugao vrha 90°. Dimenzije šava su izmerene na opti kom mikroskopu, a vrednosti se nalaze u tabeli 3.6.

Tabela 3.6 Dubine uvara, širine metala šava i odnos D/Š nakon pretapanja

	Ugao vrha elektrode		
	45°	60°	90°
Dubina [mm]	11,66	14,4	11,1
Širina [mm]	14,82	12,2	10,8
Odnos D/Š	0,79	1,18	1,03

Najve a postignuta dubina je 14,4 mm, me utim to je dimenzija metala šava sa prokapljinom koja se može videti na slici 3.40b. Kod uzoraka pretopljenog elektrodom sa uglom vrhom 45° postigunata je dubina uvara 11,66 mm. Najmanja dubina uvara od 11,1 mm postignuta je sa elektrodom iji ugao vrha je 90°. Prokapljina od 0,4 mm je dozvoljena standardom za nivo kvaliteta prihvatljivosti SRPS EN ISO 5817:2015 za nivo kvaliteta B.

3.2 Završna istraživanja

Nakon prikupljenih informacija iz uvodnih istraživanja odabrani su parametri za završna istraživanja, odnosno odgovaraju a eksperimentalna procedura za zavarivanje uzoraka i ispitivanja.

3.2.1 Priprema aktivnih premaza i uzoraka, i parametri zavarivanja

Kao aktivni premaz koriš ene su mešavine nano estica SiO₂ veli ine 40 nm i TiO₂ veli ine 20 nm u odnosima:

- 5% TiO₂ (5Ti)
- 4% TiO₂ + 1% SiO₂ (4Ti1Si),
- 3% TiO₂ + 2% SiO₂ (3Ti2Si),
- 2% TiO₂ + 3% SiO₂ (2Ti3Si),
- 1% TiO₂ + 4% SiO₂ (1Ti4Si),
- 5% SiO₂ (5Si),

a kao rastvara koriš en je etanol.

Priprema aktivnog premaza ura ena je kao u prethodnim eksperimentima (slika 3.41).



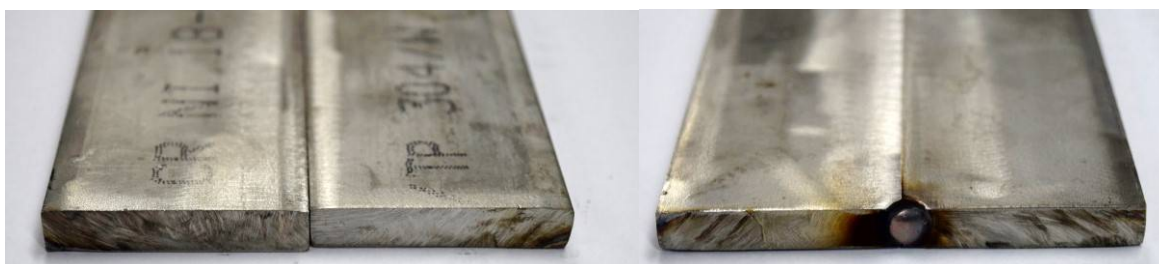
Slika 3.41 Aktivni premaz u posudama

Zavarivanje je urađeno tako što su spajane dve ploče nerđajućeg čelika AISI 304L dimenzija 200 x 50 x 10 mm. Prvobitno je iz table lima isećena ploča 2500 x 50 x 10 mm vodenim mlazom, nakon toga su isećeni uzorci dužine 200 mm. Pošto su ploče isećene vodenim mlazom bojni krajevi ploča su imali oštećenja (tragovi obrade), koja su odstranjena pripremom bojne strane (slika 3.42) na glodalici Prvomajska UHG. Na svakoj ploči pripremljena je jedna strana kako bi naleganje bilo potpuno.



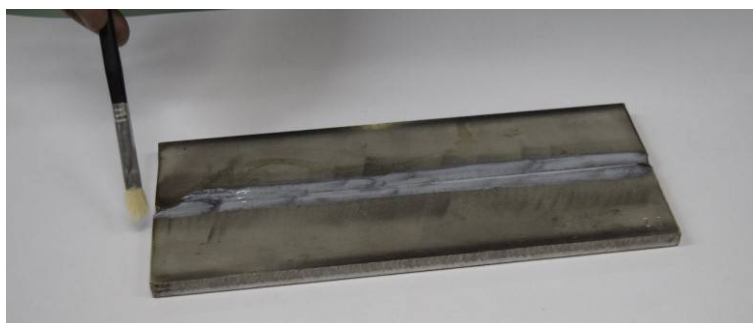
Slika 3.42 Ploče sa pripremljenom ivicom

Nakon mašinske obrade ploče su spojene jedna uz drugu u budući položaj zavarivanja (Slika 3.43a). Kako bi se sprečilo pomeranje ploča, one su na početku i kraju buduće spoja spojene kratkim montažnim šavovima (zaheftane) TIG postupkom (Slika 3.43b). Nakon spajanja krajeva ploča uzorci su prebrušeni brusnim papirom granulacije P120 da bi se oistio deo buduće spoja, potom je brušena oblast prebrisana etanolom, kako bi se ploča odmastila i oistili tragovi brušenja.



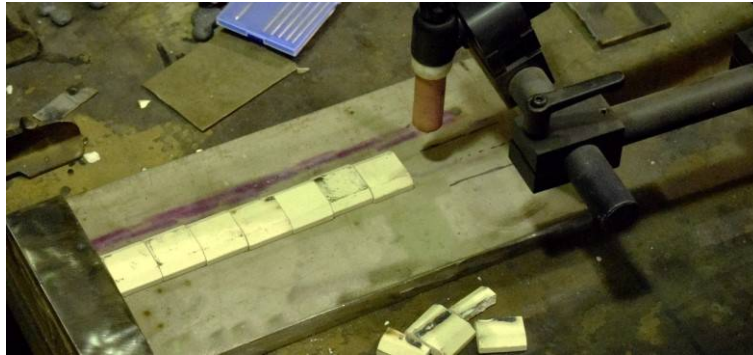
Slika 3.43 Osnovni materijal: a) pripremljena ploča za spajanje, b) prispojene ploče

Nakon pripreme materijala uzoraka, ista etiketa je uronjena u posudu sa pripremljenim aktivnim premazom koji je nanešen na uzorak u širini od oko 20 mm, kao što je prikazano na slici 3.44, gde se vidi aktivni premaz koji je bele boje. Za svaki novi uzorak, odnosno premaz koristi se ista etiketa.



Slika 3.44 Proces nanošenja aktivnog premaza

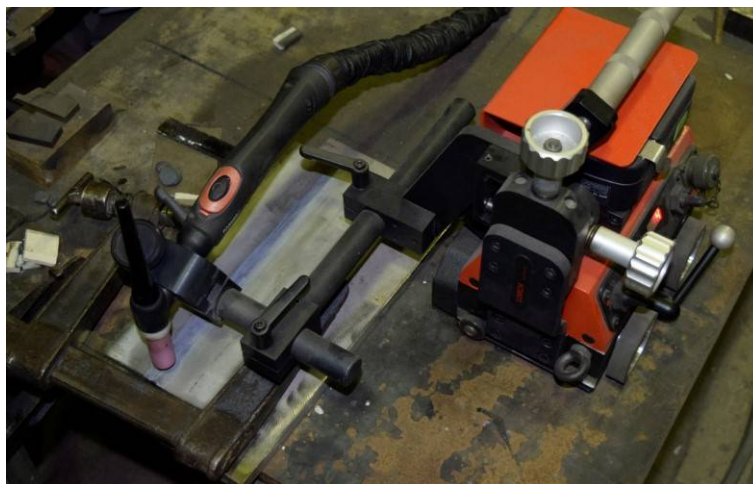
Na mestu za zavarivanje postavljene su kerami ke podložne plo ice (slika 3.45) koje bi bile ispod linije spajanja, kako bi se eliminisala mogućnost velikih prokapljina i spajanja te nog metala za radni sto.



Slika 3.45 Postavljanje podložnih keramičkih pločica

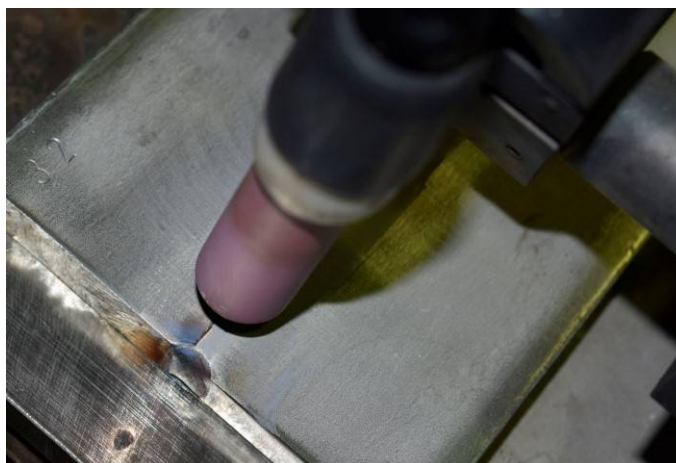
Uzorak je pre postavljanja na kerami ke podložne plo ice sa bo ne strane dodatno stegnut ru nom stegom kako bi se oja ali montažni spojevi koji spre avaju da ne bi do e do razdvajanja plo a u procesu zavarivanja usled deformacija.

Nakon postavljanja ru ne stege uzorak je postavljen na kerami ke podložne plo ice i centriran tako da gorionik TIG aparata, koji je montiran na zavariva ki traktor, Lorch, prati liniju spajanja (slika 3.46). U gorioniku je postavljena elektroda pre nika 3,2 mm sa uglom vrha 60° od legure volframa sa 2% torijum oksida, oko elektrode je montirana kerami ka mlaznica pre nika 12,7 mm. Pištolj za zavarivanje je podignut tako da vrh elektrode bude udaljen 1 mm od eli ne plo e.



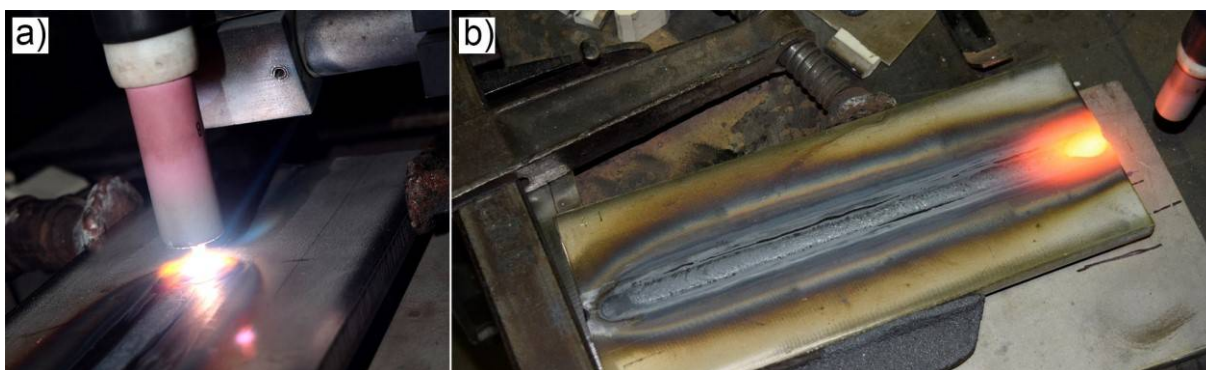
Slika 3.46 Centriranje ploče u pravcu kretanja gorionika

Aparat za zavarivanje je podešen na ja inu struje od 250 A, a kao zaštitni gas koriš en je argon isto e 99,999% sa protokom od 12 l/min. Po etak zavarivanja je pomeran oko 10 mm od ivice uzorka, kako bi se eliminisala mogućnost prokapljine (slika 3.47).



Slika 3.47 Mesto po etka zavarivanja

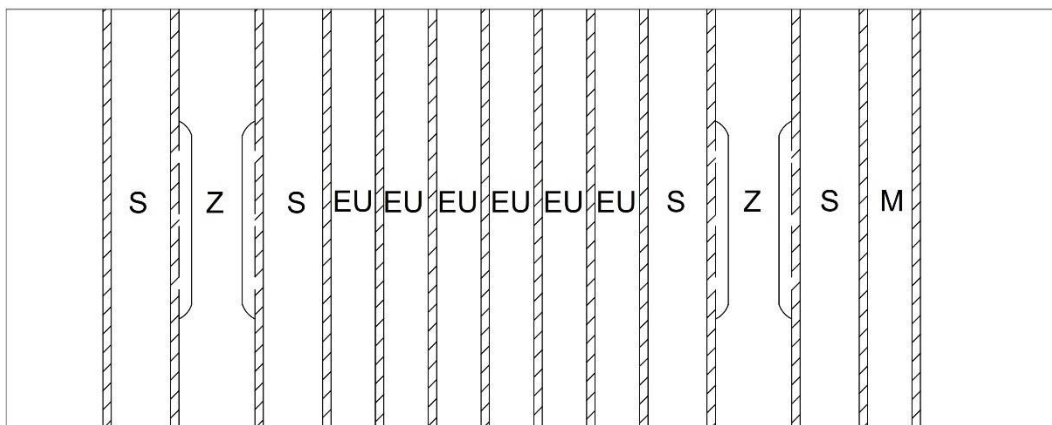
Pritiskom prekida a na gorioniku uspostavljen je elektri ni luk, nakon 3 sekunde aktiviran je traktor za zavarivanje sa brzinom kretanja od 40 mm/min. Na slici 3.48 prikazan je uspostavljen elektri ni luk, oformljeni metal šava, kao i crni tragovi na uzorku zbog velikog toplotnog zra enja i ostataka aktivnog premaza.



Slika 3.48 Proces zavarivanja: a) Uspostavljen elektri ni luk u procesu zavarivanja, b) izgled plo e po gašenju elektri nog luka

Nakon izvršenog zavarivanja na plo ama su vizuelnom kontrolom (po standardu SRPS EN ISO 5817:2015) uo eni nedostaci i izvršeno je isecanje uzoraka radi daljih ispitivanja po standardu SRPS EN ISO 15614:2004, sa planom rezanja prikazanom na slici 3.49. Uzorci su obeleženi slovima:

- S – Epruvete za ispitivanje savijanjem – SRPS EN ISO 5173:2010
- Z – Epruvete za ispitivanje zateznih karakteristika – SRPS EN ISO 4136:2012
- EU – Epruvete za ispitivanje energije udara – SRPS EN ISO 9016:2013
- M – Uzorak za ispitivanje makro i mikrostrukture, merenje mikrotvrdo e i ispitivanje hemijskog sastava.



Slika 3.49 Plan rezanja zavarenih ploha

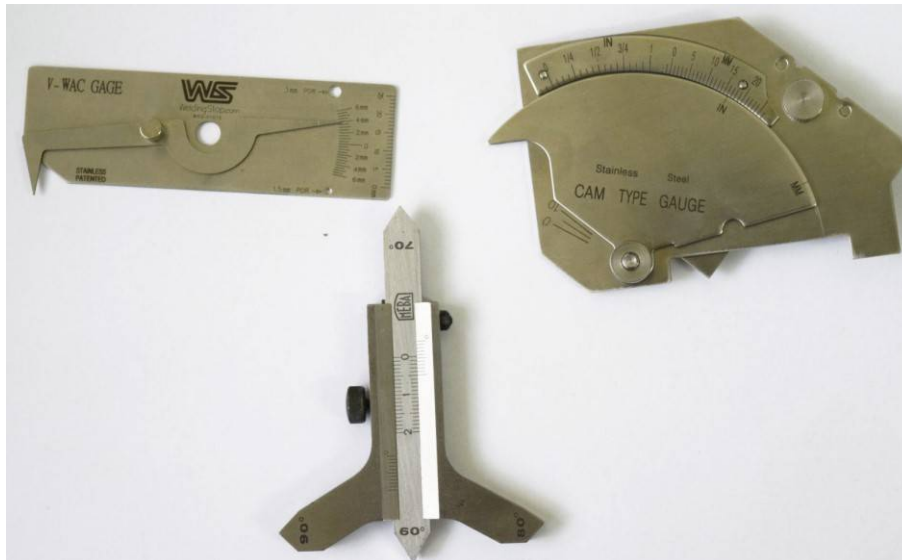
Isecanje je izvršeno trakastom testerom Pilous ARG 300 plus F (slika 3.50) sa aktivnim hladjenjem emulzijom i širinom reza 2 mm.



Slika 3.50 Trakasta testera Pilous ARG 300 plus F

3.2.2 Vizuelna kontrola i makro ispitivanje

Nakon zavarivanja na ploha je izvršena vizuelna kontrola zavarenih spojeva po standardu SRPS EN ISO 6520:2013 uzevši u obzir da se početnih i krajnjih 25 mm ne uzima u razmatranje. Merenje nepravilnosti na metalu šava urađeno je merilima koje se koriste za vizuelnu kontrolu (slika 3.51), a prihvatljivost izmerene nepravilnosti proverena u skladu sa standardom SRPS EN ISO 5817:2015.



Slika 3.51 Merila za vizuelnu kontrolu metala šava

Za makro ispitivanje je nakon isecanja iz svake ploče uzet uzorak sa oznakom M koji je skraćen sa obe strane do širine 25 mm, kako bi se lakše izvršila priprema. Zbog dimenzija uzorka, zatapanje uzorka radi dalje pripreme izvršeno u polimetil metakrilatu. Nakon otvaranja polimera izvršeno je brušenje uzorka SiC brusnim papirima po redu od P360 pa postepeno finijim brusnim papirom do najfinijeg P2500. Poliranje je izvršeno dijamantskom suspenzijom od 6, 3, 1 i 0,25 μm . Po završetku pripreme uzorka sklonjen je polimer kako bi se lakše izvršilo nagrizanje Carskom vodom. Fotografisanje uzorka izvršeno je digitalnim fotoaparatom Nikon D3300. Takođe, fotografisanje makro uzorka je urađeno i na svetlosnom mikroskopu pri uvećanju od 20x, nakon čega su slike sklapanje u celinu kako bi se dobio kompletan izgled metala šava. Spajanje slika je izvedeno u programu Image composition editor.

3.2.3 Mikroskopska ispitivanja

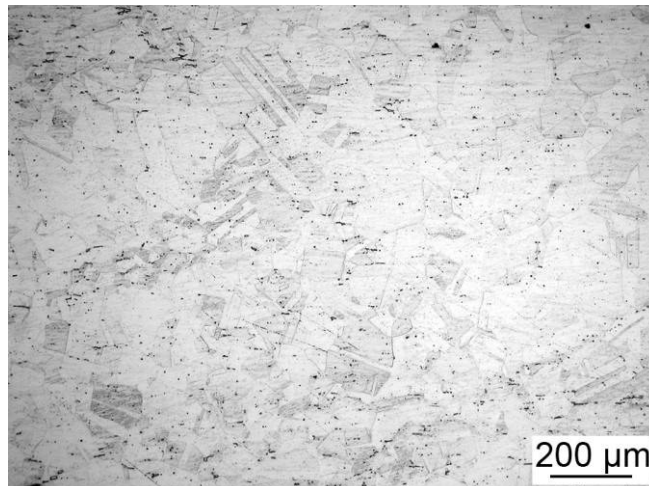
3.2.3.1 Svetlosna mikroskopija

Uzorci za makro ispitivanje su iskorisćeni za posmatranje mikrostrukture. Nagriženi uzorci su posmatrani svetlosnim mikroskopom LEITZ-Orthoplan (slika 3.52) pri uvećanju od 50X i 100X kako bi se utvrdilo da li postoje uključivi ili neka značajna promena u mikrostrukтури. U oblastima metala šava, linije stapanja i osnovnog materijala urađeno je fotografisanje na svetlosnom mikroskopu.



Slika 3.52 Svetlosni mikroskop LEITZ-Orthoplan

Na slici 3.53, kao ilustracija, prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala.



Slika 3.53 Mikrostruktura osnovnog materijala (SM)

3.2.3.2 Skening elektronska mikroskopija

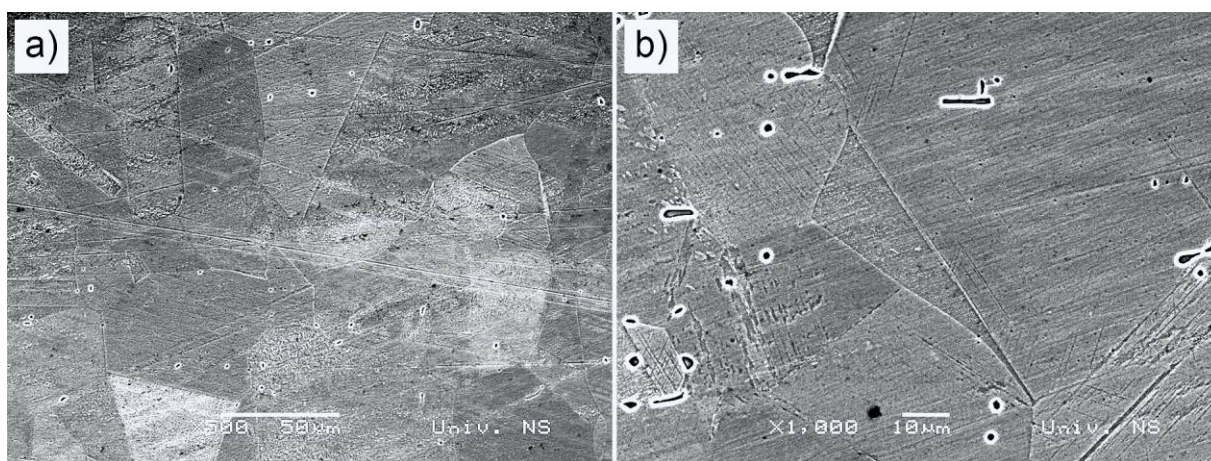
Nakon izvršenog ispitivanja na svetlosnom mikroskopu uzorci su ispitani na skening elektronskom mikroskopu (Scanning Electron Microscope SEM) JEOL JSM 6460LV, koji je prikazan na slici 3.54. Posmatrani su metalografski uzorci i reprezentativne

površine loma. Tako e na istom ure aju izvršena je hemijska mikroanaliza pomo u energetsko disperzivnog spektrometra (EDS).



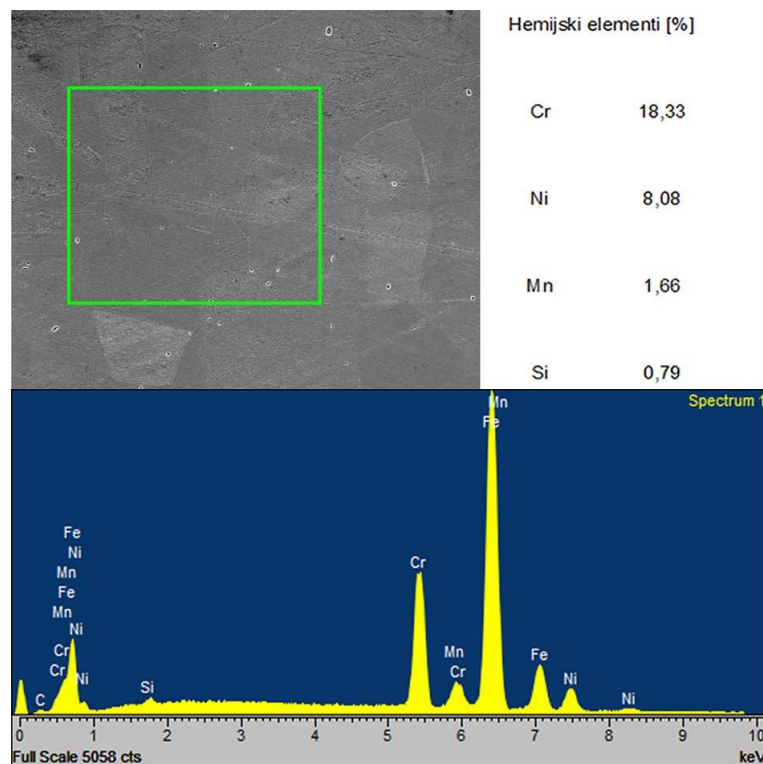
Slika 3.54 Skening elektronski mikroskop JEOL JSM 6460LV

Na slici 3.55, kao ilustracija, prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala dobijena na SEM mikroskopu.



Slika 3.55 Mikrostruktura osnovnog materijala (SEM)

Tokom ispitivanja uzoraka na SEM-u izvršena je i EDS analiza. Na slici 3.56 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala i može se videti mesto na kom je izvršena EDS analiza (uokvireno zelenim pravougaonikom). Na spetrogramu su vidljivi pikovi energija na osnovu kojih program INCA Oxford identifikuje prisutne elemente, kao i udeo detektovanih elemenata. U osnovnom materijalu pored železa i ugljenika detektovani su još hrom, nikel, mangan i silicijum. Usled ograničenja metode EDS, ostali prisutni elementi u AISI 304L (kao C, S, P, N) nisu mogli biti pouzdano detektovani i kvantifikovani.



Slika 3.56 EDS analiza osnovnog materijala

3.2.4 Ispitivanje hemijskog sastava

Nakon što su na uzorcima završena makro i metalografska ispitivanja, isti su iskorišteni za ispitivanje hemijskog sastava osnovnog materijala i metala šava. Ispitivanje je urađeno po standardu SRPS C.A1.011:2004 na optičkom emisionom spektrometru (OES) ARL ISpark 8860, kako bi se ustanovilo da li se zavarivanjem A-TIG postupkom sa premazima različitog sastava utiče na hemijski sastav metala šava. Tako je posebna pažnja je posvećena prisustvu volframa u metalu šava, kao posljedica topljenja elektrode, što se smatra greškom TIG zavarivanja.

Hemijski sastav osnovnog materijala dat je u tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Hemijski sastav osnovnog materijala

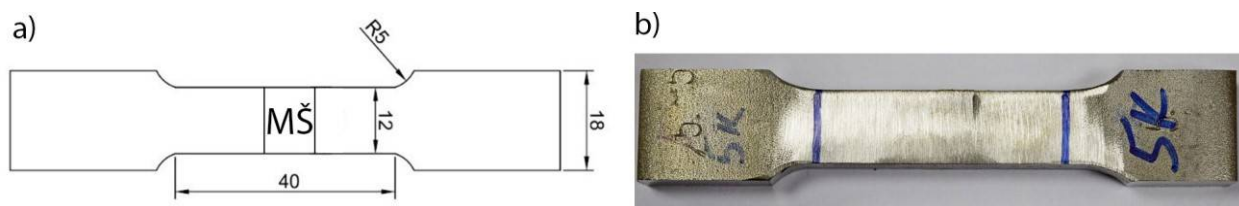
Uzorak	Hemijski elementi, mas. %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Fe
OM	0,02	0,042	1,55	18,63	8,23	0,032	0,0004	ostalo

3.2.5 Ispitivanje mehaničkih osobina

3.2.5.1 Ispitivanje zatezanjem

Iz svake ploče pripremljena su po dve epruvete za ispitivanje zateznih karakteristika. Epruvete za zatezanje su obrađene na glodalici Prvomajska UHG prema dimenzijama prikazanim na slici 3.57a. Epruveta bliža početku zavarivane ploče obeležena je sa P,

a epruveta bliže kraju zavarene plo e obeležena je sa K. Pored epruveta iz zavarenih plo a ispitane su dve epruvete napravljene od osnovnog materijala.



Slika 3.57 Epruveta za zatezanje: a) dimenzije epruvete, b) izgled pripremljene epruvete

Pre početka ispitivanja, na epruvetama je odstranjeno nadvišenja metala šava, što je ura eno brusilicom (slika 3.57b). Nakon završene pripreme izmerene su vrednosti popre nih preseka epruveta i obeležena rastojanja na 20 mm sa obe strane šava, odnosno 40 mm, koje e predstavljati po etnu dužinu (L0).

Ispitivanje zatezanjem je ura eno popre no u odnosu na pravac zavarivanja po standardu SRPS ISO 4136:2012 na hidrauli noj kidalici Schenck hydropuls PSB maksimalnog opsega 250kN (slika 3.58). Proces ispitivanja je kontrolisan iz ra unarskog programa Tensm56b u koji su pre početka zatezanja unete dimenzije uzorka. Program pored upravljanja kidalicom vrši i akviziciju podataka sa senzora sile i senzora pomeranja na osnovu kojih program generiše krivu napona deformacije i detektuje oblast napon te enja. Brzina zatezanja je iznosila 25 MPa/s.



Slika 3.58 Hidrauli na kidalica Schenck Schenck hydropuls PSB

Mehani ke osobine osnovnog materijala date su u tabeli 3.8.

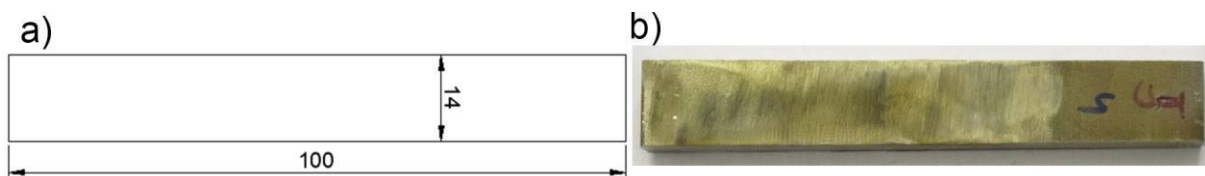
Tabela 3.8 Mehaničke osobine osnovnog materijala

Uzorak	Napon tečenja Re [MPa]	Zatezna vrsta σ_{Rm} [MPa]	Procentualno izduženje A [%]	Procentualno suženje Z [%]
Osnovni materijal	464	696	60	63
	484	700	55	58,5

Nakon izvršenih ispitivanja zateznih karakteristika na dobijenim rezultatima izvršena je analiza varijansi (ANOVA) pri nivou pouzdanosti od 95% i Takijev test (Tukey) u programskom paketu Minitab 18, kako bi se izvelo grupisanje signifikantnih uzoraka.

3.2.5.2 Ispitivanje savijanjem

U skladu sa standardom za kvalifikaciju zavarenog spoja SRPS EN ISO 15614:2004 uzorci su ispitani na savijanje preko lica (2 uzorka) i savijanje preko korena (2 uzorka), ali je neophodno bilo pre ispitivanja obrusiti nadvišenja metala šava. Dimenzije epruveta za savijanje date su na slici 3.59a.



Slika 3.59 Epruveta za savijanje: a) dimenzije epruvete, b) izgled pripremljene epruvete

Nakon brušenja metala šava (slika 3.59b), savijanje je ispitano po standardu SRPS EN ISO 5173:2010 na univerzalnoj hidrauličnoj kraljici WPM VEB Leipzig 282/58, savijanjem u tri tačke na odgovarajućem priboru, slika 3.60.



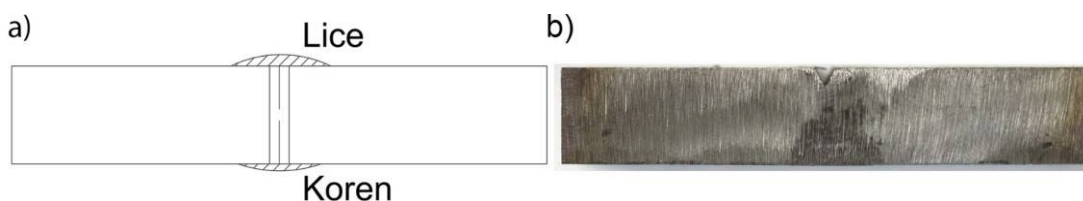
Slika 3.60 Savijanje u tri tačke

Trn, odnosno srednja tačka savijanja je pre nika četiri puta veća od debljine uzorka tj. iznosi 40 mm, na osnovu toga izračunato je rastojanje između nosača koje je 60 mm. Savijanje je radeno dok se epruveta ne savije do 180°. Dve epruvete su savijene tako da je zatezna strana koren metala šava, a dve epruvete tako da je

zatezna strana lice metala šava. Nakon izvršenih ispitivanja na epruvetama je izvedeno vizuelno ispitivanje kako bi se ustanovilo da li ima prslina.

3.2.5.3 Ispitivanje energije udara

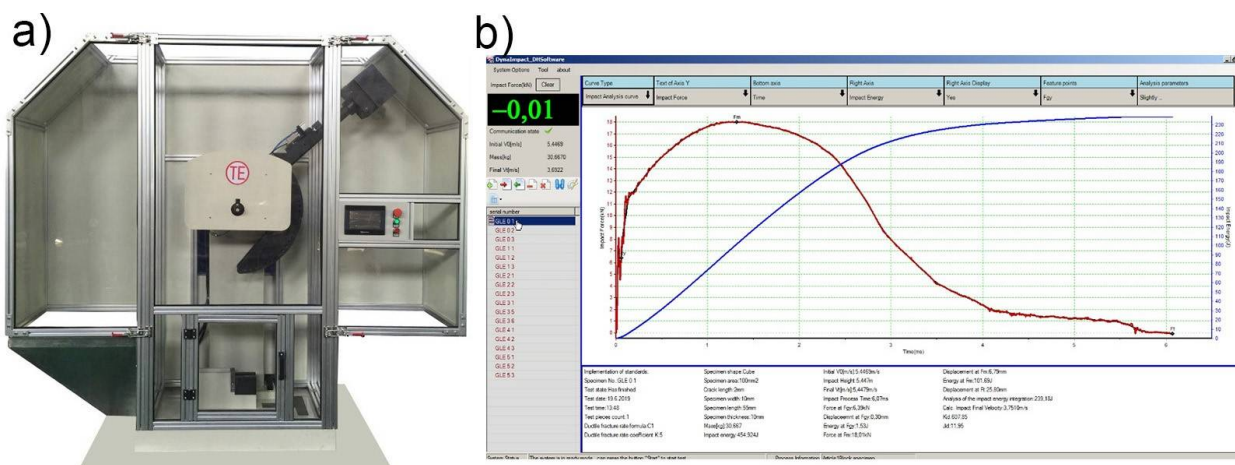
Epruvete za energiju udara, dimenzija 10 x 10 x 55 mm izrađene su u skladu sa standardom SRPS EN ISO 148:2011. Površina sa licem šava, je obrušena do ravnosti osnovnog materijala prema zahtevu standarda SRPS EN ISO 9016:2013. Nakon brušenja, napravljen je standardni „V“ zarez dubine 2 mm, profilnim glodalom na obje strane epruvete (VWT položaj po standardu) u sredini metala šava (Slika 3.61a). Izrađene su po 3 epruvete iz svake ploče. Dužina od 55 mm je postignuta tako što su brusilicom odsejeni krajevi epruvete, a potom brušenjem na brusnom kamenu postignuta dimenzija od 55 mm, odnosno 27,5 mm simetrično od V zarez (slika 3.61b).



Slika 3.61 Epruveta za ispitivanje energije udara: a) mesto V zarez b) izgled pripremljene epruvete

Ispitivanje energije udara urađeno je na instrumentiranom Šarpijevom klatnu Jinan Testing Equipment JTW 450 energije 450 J na sobnoj temperaturi od 22° C.

Klatno je povezano sa računarom i putem programa Dyna Impact prikupljeni su podaci sa senzora udara a o sili tokom ispitivanja i vremenu delovanja sile (slika 3.62).



Slika 3.62 Ispitivanje energije udara: a) instrumentirano Šarpijevo klatno JTW 450, b) prikaz programa Dyna Impact

Energija udara osnovnog materijala data je u tabeli 3.9.

Tabela 3.9 Energije udara ispitanih uzoraka osnovnog materijala

Uzorak		Epruveta	Energija za stvaranje prsline [J]	Energija za stvaranje prsline [J]	Ukupna energija udara KV [J]
OM	Osnovni materijal	1	105	153	258
		2	111	171	282
		3	106	173	279
		Srednja vr.	107	166	273

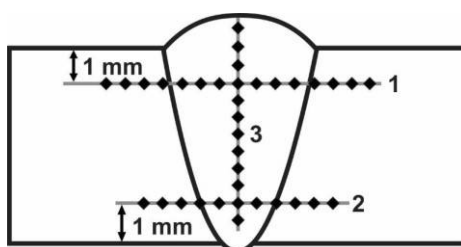
Nakon izvršenih ispitivanja energije udara na dobijenim rezultatima izvršna je analiza varijansi (ANOVA) pri nivou pouzdanosti od 95% i Takijev test (Tukey) u programskom paketu Minitab 18, kako bi se izvelo grupisanje signifikantnih uzoraka.

3.2.5.4 Ispitivanje mikrotvrdo e

Po završetku ispitivanja mikrostrukture, a na istim uzorcima je izvršeno merenje mikrotvrdo e po Vikersu. Mikrotvrdo a je izmerena na ure aju Tukon 1102 (slika 3.63) sa optere enjem od 0,1 kgf (0,9805 N) u oblastima osnovnog materijala, liniji stapanja i metala šava, prema šemi prikazanoj na slici 3.64. Rastojanje prve i druge linije bilo je 1 mm od površina uzoraka, dok linija tri prolazi kroz sredinu metala šava. Rastojanje između otisaka iznosilo je 1 mm.



Slika 3.63 Ure aje za merenje tvrdo e Wilson Tukon 1102

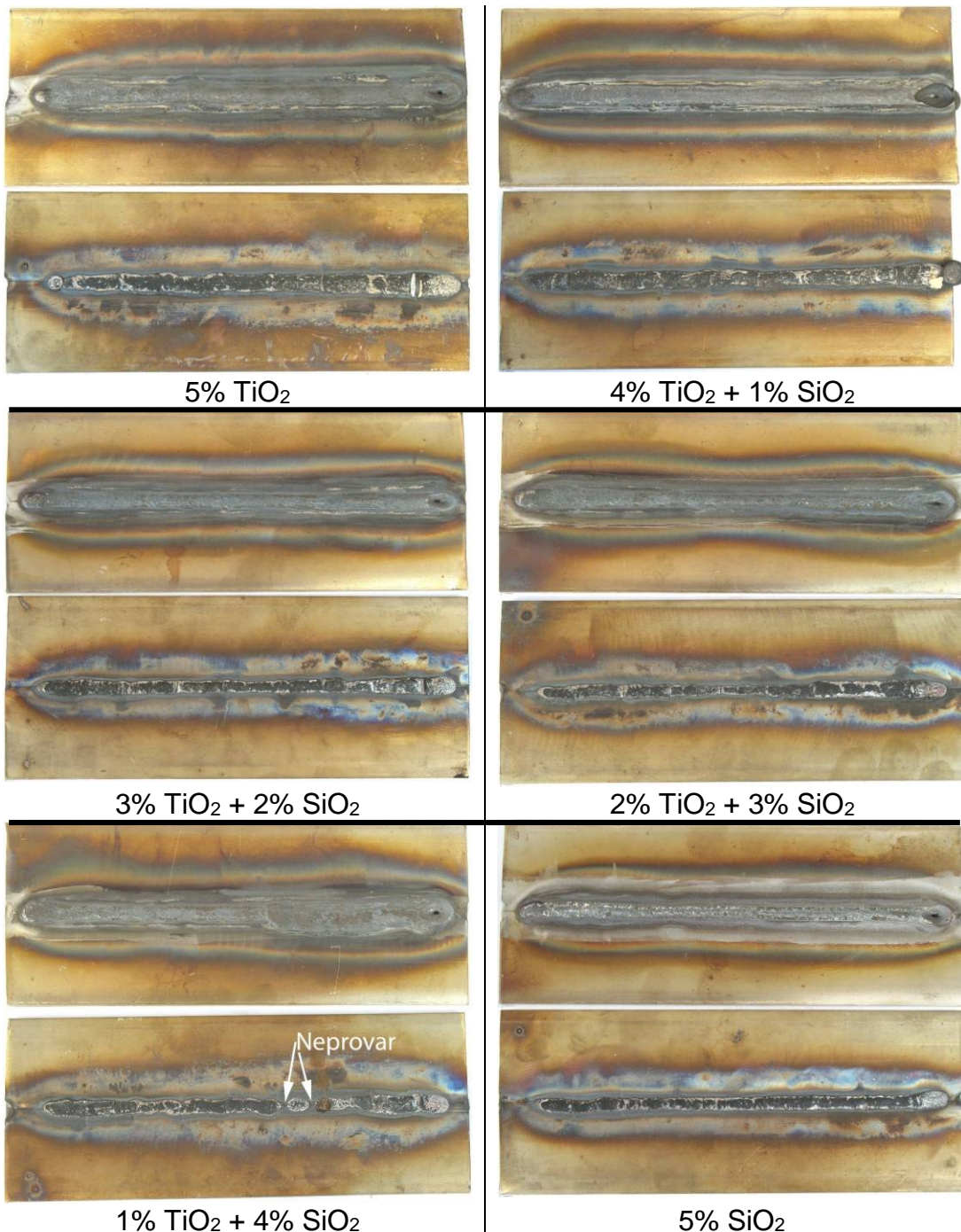


Slika 3.64 Šema merenja mikrotvrdo e

4 Rezultati završnih istraživanja

4.1 Vizuelna kontrola i makro ispitivanje

Na slici 4.1 prikazane su slike lica i korena metala šava na kojima je izvršena vizuelna kontrola.



Slika 4.1 Zavareni uzorci prikazani sa strane lica i korena

Na uzorcima je uo eno nekoliko nepravilnosti, na svakoj plo i postoji izlazna rupa sa strane lica metala šava, kao i neprovar plo e u nekoliko prvih milimetara, me utim ove greške se nalaze u 25 mm od po etka i kraja zavarenog spoja što se po standardu SRPS EN ISO 15614:2004 izuzima iz razmatranja. U tabeli 4.1 prikazana je dužina koja predstavlja vrednost od uspostave elektri nog luka do pojave prokapljine sa druge strane. To ukazuje na brzinu dejstva aktivnog premaza, na osnovu kojih se vidi da je najmanje rastojanje od mesta uspostavljanja elektri nog luka do punog provara pri upotrebi aktivnog premaza na bazi estica 4% TiO₂ i 1% SiO₂. Najduže potrebno vreme za potpuni uvar je kod uzorka sa 1% TiO₂ i 4% SiO₂.

Tabela 4.1 Rastojanje od uspostave elektri nog luka do punog provara

Uzorak	5% TiO ₂	4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	5% SiO ₂
Rastojanje [mm]	7,4	6,2	8,5	10,6	12	8,7

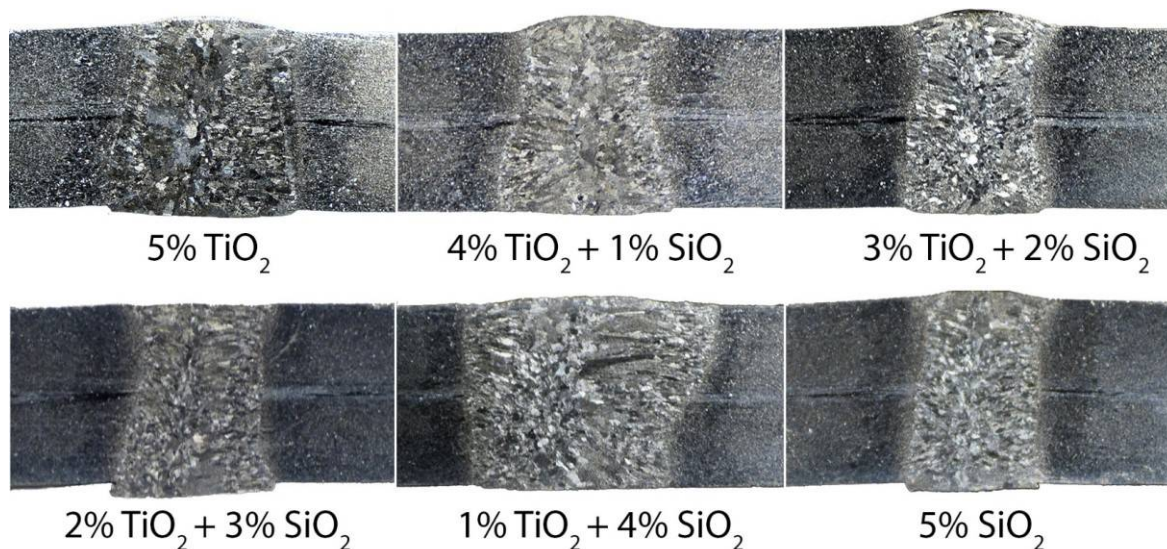
Na zavarenim uzorcima sa korene strane vidljivo je razlivanje rastopljenog metala koji se kretao po kerami koj plo ici, a na korenu zavara su vidljivi tragovi kerami ke plo ice. Na uzorku zavarenim sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 1% TiO₂ i 4% SiO₂ na dva mesta je uo en neprovar od 3 i 4 mm (obeleženo strelicom slika 4.1). Kod uzorka zavarenog sa premazom od 5% TiO₂ pred sam kraj zavarenog spoja došlo je do pojave prokapljine izme u dve kerami ke podložne plo ice, me utim prokapljina je na samoj granici 25 mm od kraja. Izmerene dimenzije metala šava nalaze se u tabeli 4.2.

Tabele 4.2 Dimenzije metala šava

Uzorak	Širina šava [mm]		Nadvišenje [mm]	
	Lice	Koren	Lice	Koren
5% TiO ₂	10,5	9,4	0,5	0,7
4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	9,9	8,5	0,4	0,75
3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	7,7	8,5	0,3	0,75
2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	8,7	8,6	-0,2	0,8
1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	14	10,8	0,5	0,25
5% SiO ₂	6,7	8,8	0,6	0,6

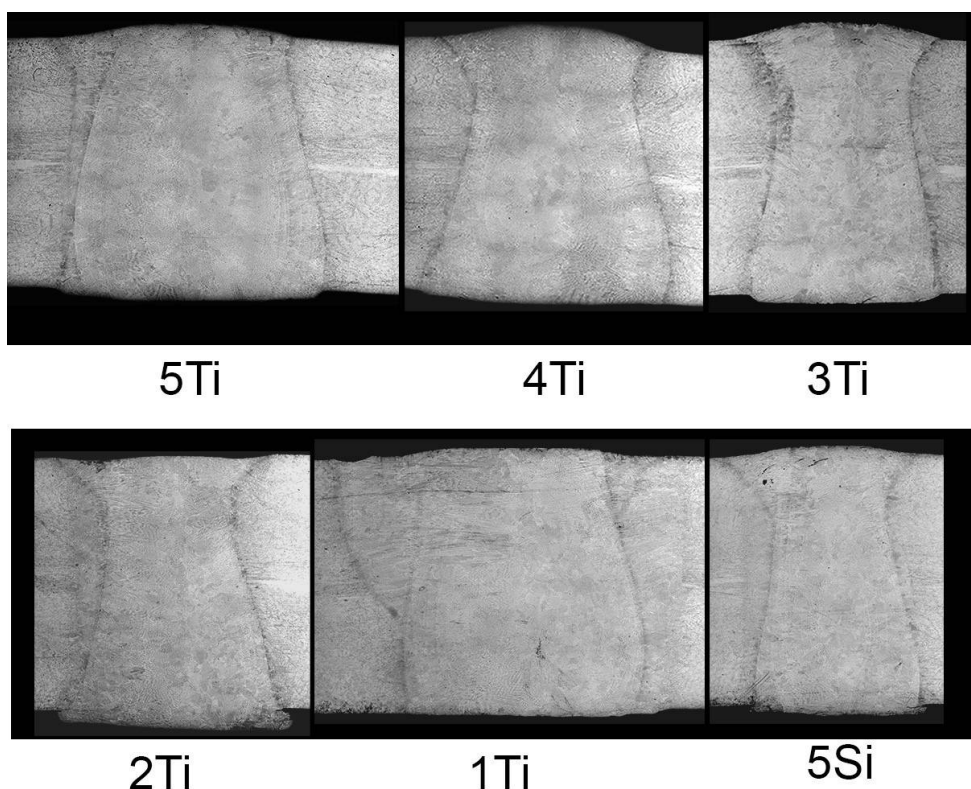
Uo ena greška neprovara oznake 4021 po standardu SRPS EN ISO 6520:2013 na plo i zavarenom sa mešavinom premaza 1% TiO₂ i 4% SiO₂ je prihvatljiva po standardu SRPS EN ISO 5817:2015 za nivo kvaliteta D, ali nije za nivo B i C.

Makro preseci uzorka snimljenih digitalnim fotoaparatom nalaze se na slici 4.2.



Slika 4.2 Izgled makro preseka zavarenih uzoraka

Kod uzoraka se vidi provar od 10 mm, kao i tragovi prokapljine te nog metala razlivenog preko kerami ke podložne plo ice. Na uzorcima je vidljiva i trakavost u osnovnom materijalu kao posledica valjanja. Na slici 4.3 prikazani su dobijeni metali šava pri uve anju od 20x na svetlosnom mikroskopu.



Slika 4.3 Izgled metala šava zavarenih uzoraka

Na ve ini uzoraka vidljivo je da se metal šava širi u korenom delu, što pokazuju i izmerene vrednosti u tabeli 4.2. Kod uzorka zavarenog sa aktivnom premazom 1% TiO₂ i 4% SiO₂ širina metala šava je najve a. Kod ovog uzorka došlo je do proširenja šava u drugoj polovini plo e, a u istoj oblasti uz proširenje javio se neprovar.

Uzorak za makro ispitivanje se nalazio na kraju zavarene ploče gdje je došlo do proširenje metala šava. Odnosno do rastapanja metala je došlo više u širinu u odnosu na dubinu metala šava.

Kako bi se odredio odnos dubine i širine metala šava (D/Š) prvo je potrebno izračunati srednju vrednost širine metala šava, rezultat je prikazan u tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Odnos D/Š

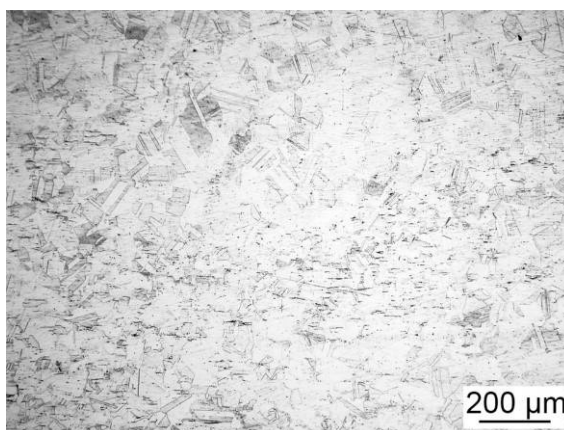
Uzorak	Odnos D/Š		Srednja vrednost odnosa D/Š za ceo MŠ
	Lice	Koren	
5% TiO ₂	0,95	1,06	1,01
4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	1,01	1,18	1,09
3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	1,30	1,18	1,23
2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	1,15	1,16	1,16
1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	0,71	0,93	0,81
5% SiO ₂	1,49	1,14	1,29

Na osnovu rezultata u tabeli 4.3 najviši odnos D/Š je postignut kod uzorka zavarenog sa 5% SiO₂, drugi po redu je uzorak zavaren sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 3% TiO₂ i 2% SiO₂, dok su najniži rezultati postignuti kod uzorka zavarenog sa mešavinom estica 1% TiO₂ i 4% SiO₂.

4.2 Mikroskopska ispitivanja

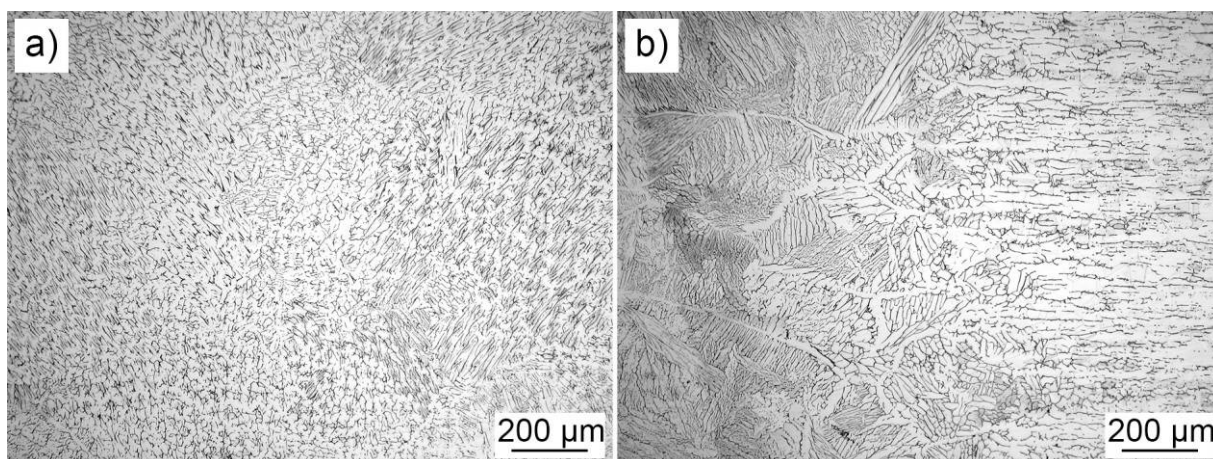
4.2.1 Svetlosna mikroskopija

Na slici 4.4 je prikazana mikrostruktura osnovnog materijala uzorka zavarenog sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 3% TiO₂ i 2% SiO₂ u etanolu. Ovakva mikrostruktura je konstatovana i kod ostalih uzoraka u osnovnom materijalu.

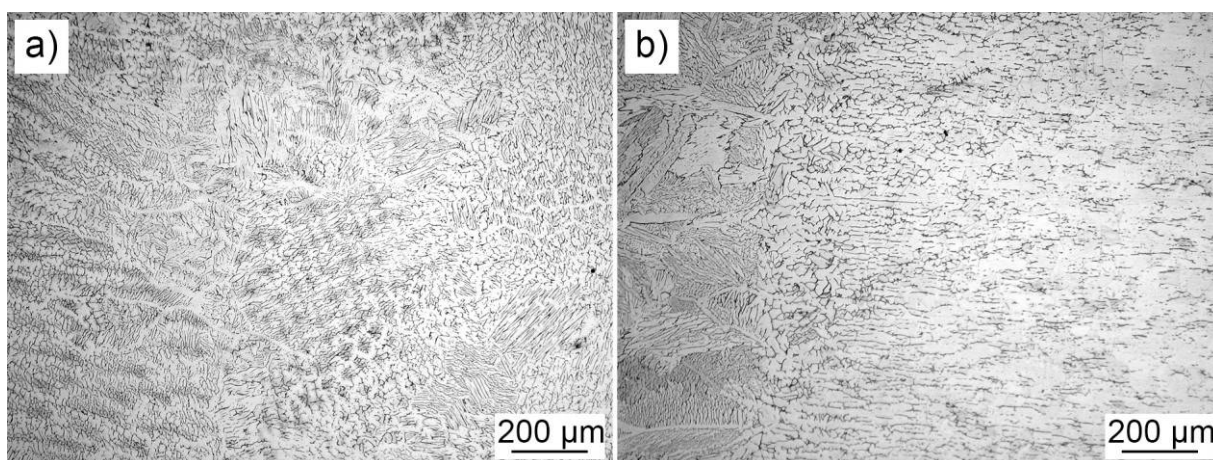


Slika 4.4 Mikrostruktura u oblasti osnovnog materijala kod zavarenog uzorka 3Ti2Si (SM)

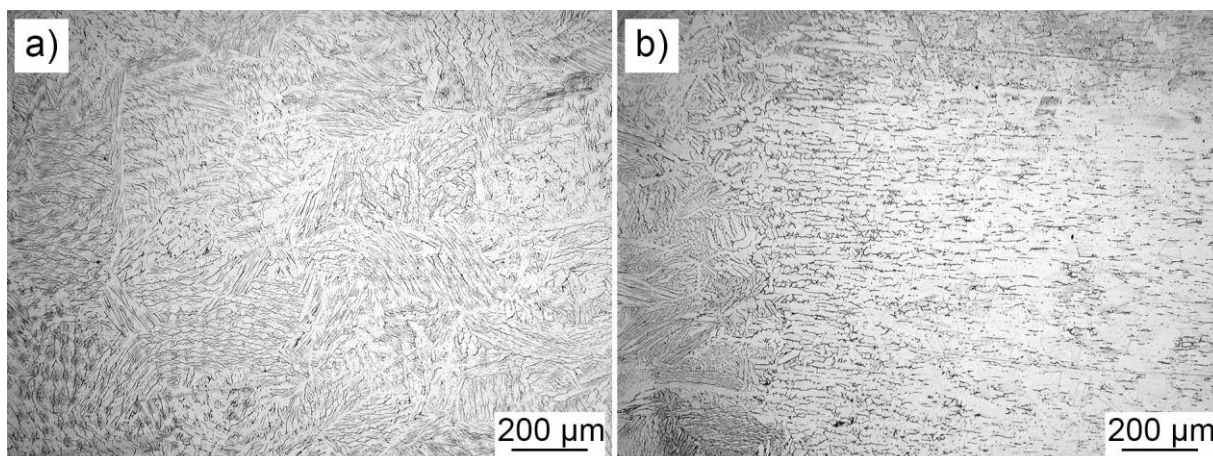
Na slikama 4.5-4.10 prikazana je mikrostruktura zavarenih uzoraka u metalu šava i granici metala šava, odnosno liniji stapanja.



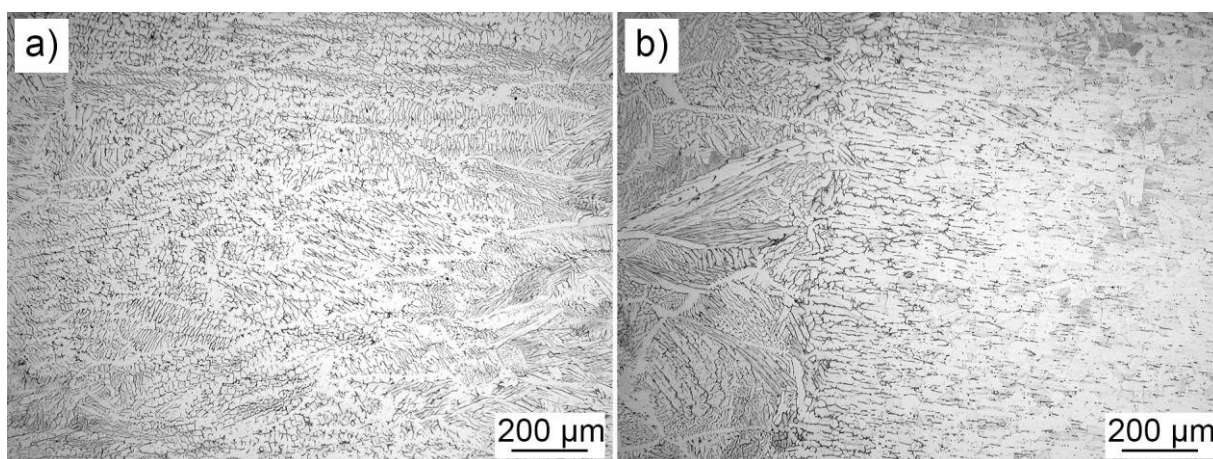
Slika 4.5 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 5% TiO₂:
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)



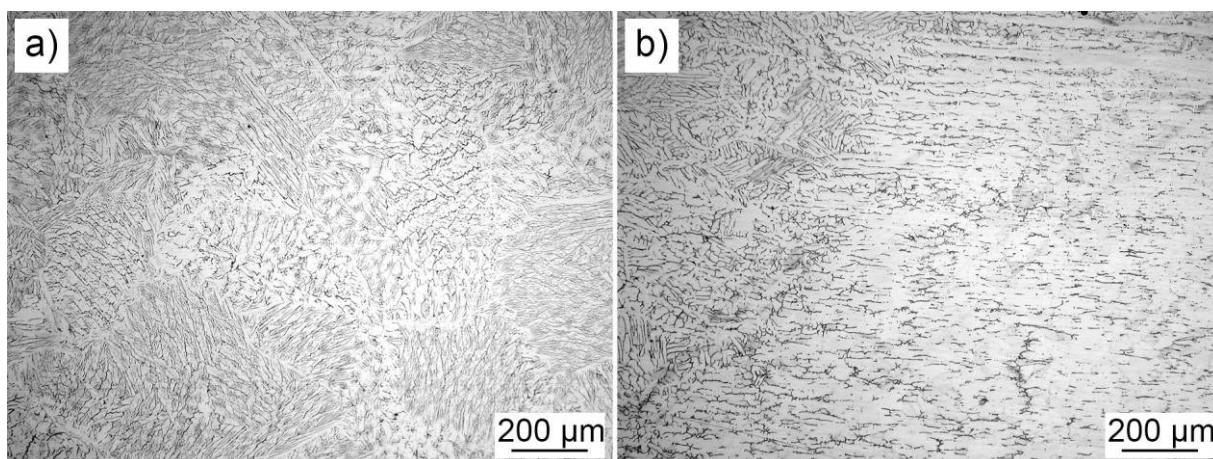
Slika 4.6 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 4% TiO₂ + 1% SiO₂:
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)



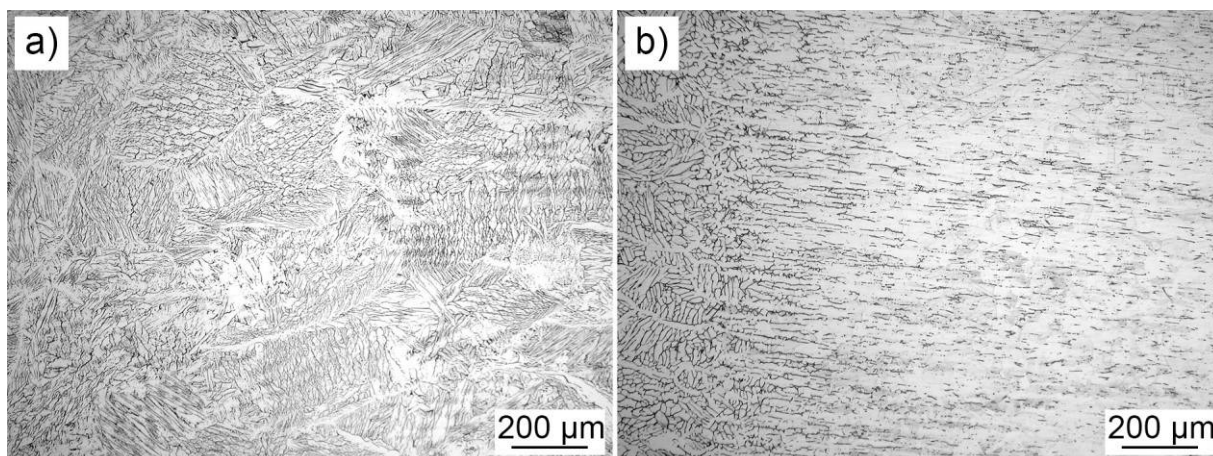
Slika 4.7 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 3% TiO_2 + 2% SiO_2 :
 a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)



Slika 4.8 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 2% TiO_2 + 3% SiO_2 :
 a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)



Slika 4.9 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 1% TiO_2 + 4% SiO_2 :
 a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)



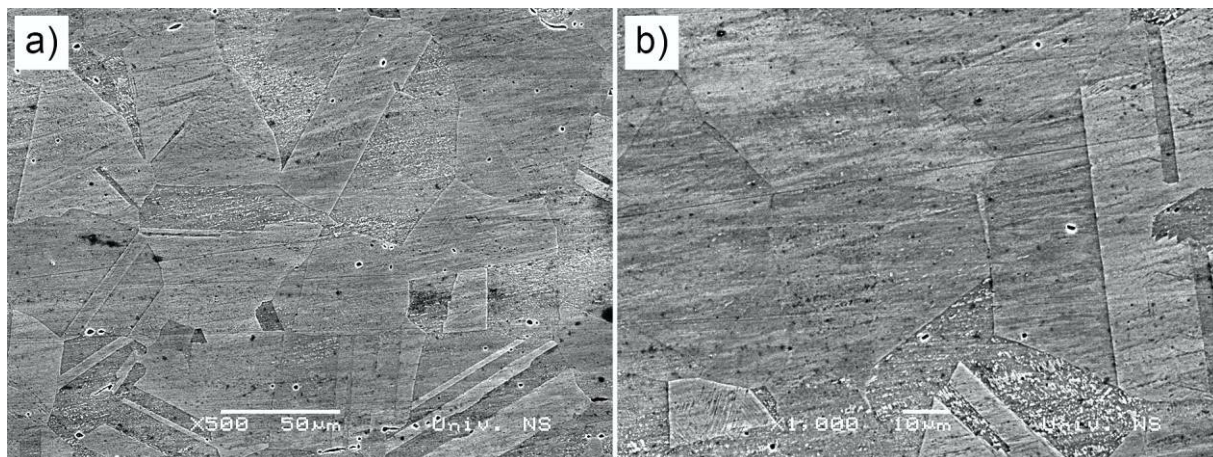
Slika 4.10 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 5% SiO₂:
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SM)

Na slici mikrostrukture osnovnog materijala (slika 4.4) vidljiva je tipična austenitna struktura sa poligonalnim zrnima. Kod svih uzoraka, u osnovnom materijalu, kroz sredinu debljine uo lijevo je smanjenje austenitnog zrna, kao i povećanje udjela i prisustva δ -ferita. Na slikama mikrostrukture metala šava (slike 4.5a-4.10a) vidljiva je dendritska struktura, sa orijentacijom zrna u različitim pravcima. Ovo je tipična morfologija mikrostrukture kod zavarivanja neretko ih austenitnih elika. U linijama stapanja metala šava kod svih uzoraka (slike 4.5b-4.10b) vidljiva je usmerena dendritska struktura zbog procesa hlađenja, međutim u ovoj oblasti nije uočena promjena veličine austenitnog zrna sa strane osnovnog materijala u odnosu na veličinu austenitnih zrna u osnovnom materijalu, slika 4.4.

4.2.2 Skenirana elektronska mikroskopija

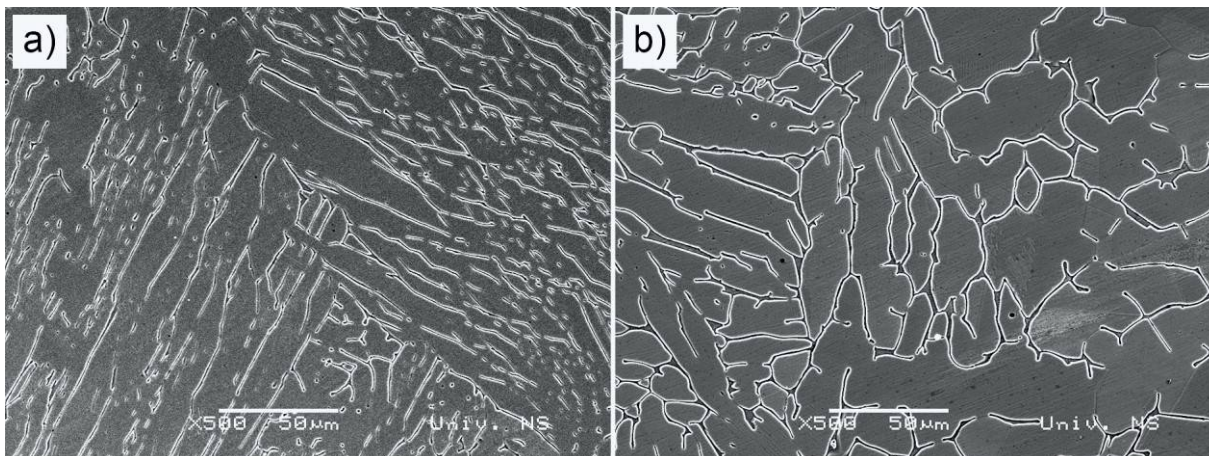
Rezultati ispitivanja mikrostrukture na SEM-u, dati su na slikama od 4.11 do 4.19. Prvo je izvršeno ispitivanje mikrostrukture u osnovnom materijalu i metalu šava, a potom je urađena EDS analiza metala šava.

Na slici 4.11 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala.

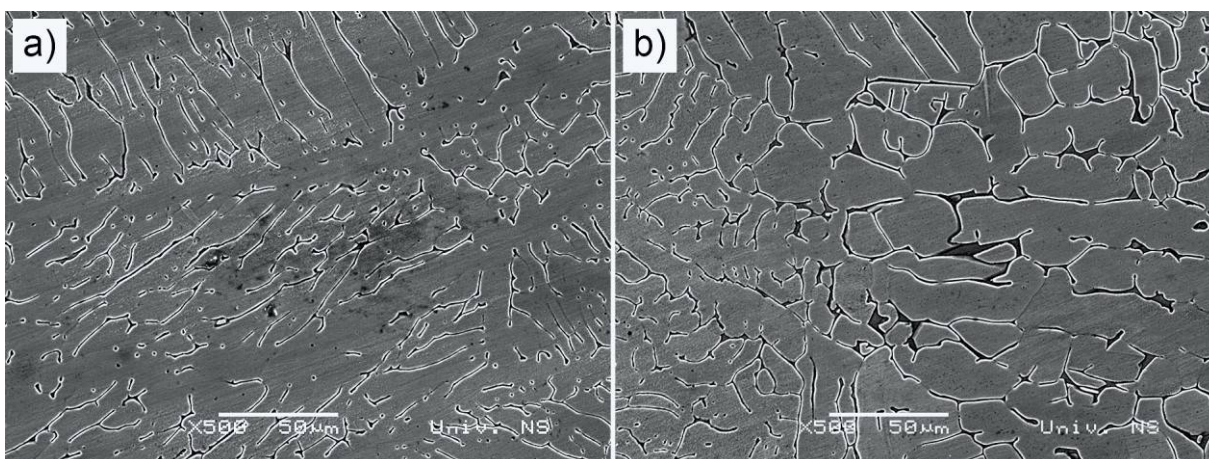


Slika 4.11 Mikrostruktura osnovnog materijala

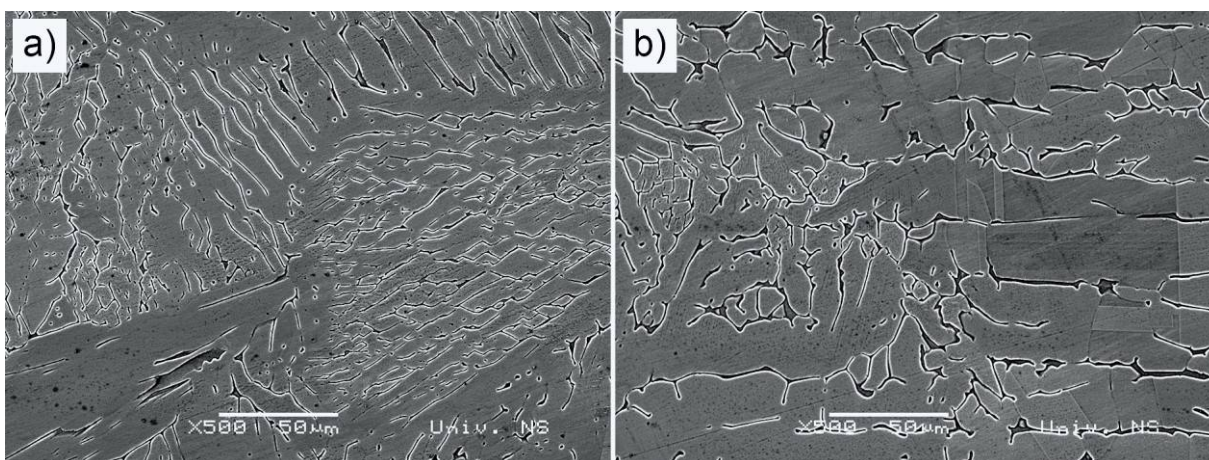
Na slikama 4.12–4.16 prikazane su mikrostrukture metala šava (a) i linije stapanja (b), odnosno granica izme u metala šava i osnovnog materijala uzoraka zavarenih sa aktivnim premazom.



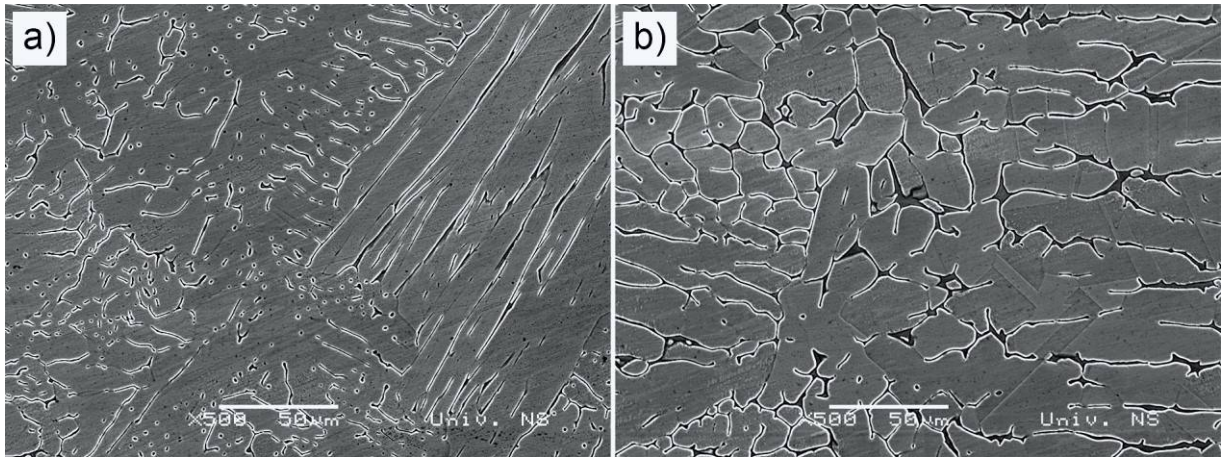
Slika 4.12 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 5% TiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)



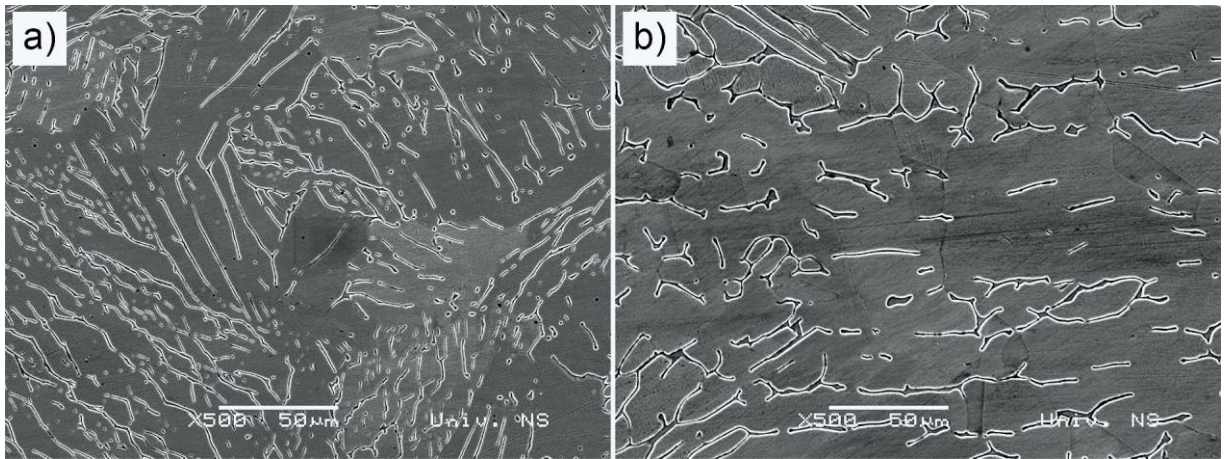
Slika 4.13 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 4% TiO_2 + 1% SiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)



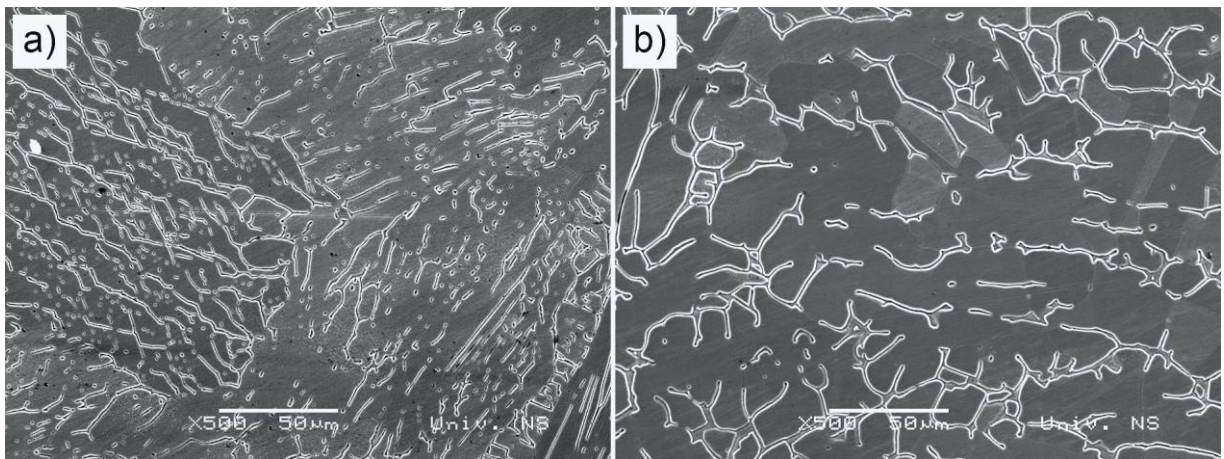
Slika 4.14 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 3% TiO_2 + 2% SiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)



Slika 4.15 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 2% TiO_2 + 3% SiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)



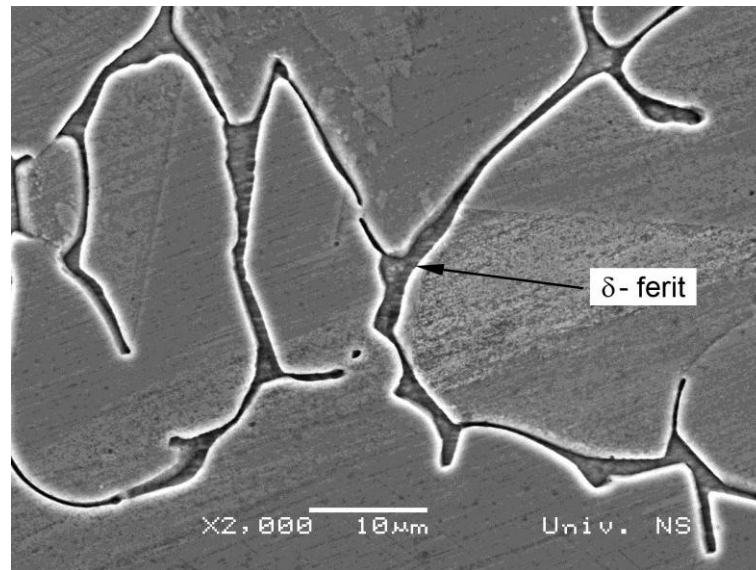
Slika 4.16 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 1% TiO_2 + 4% SiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)



Slika 4.17 Mikrostruktura uzorka zavarenog aktivnim premazom sa 5% SiO_2 :
a) metala šava, b) linija stapanja metala šava (SEM)

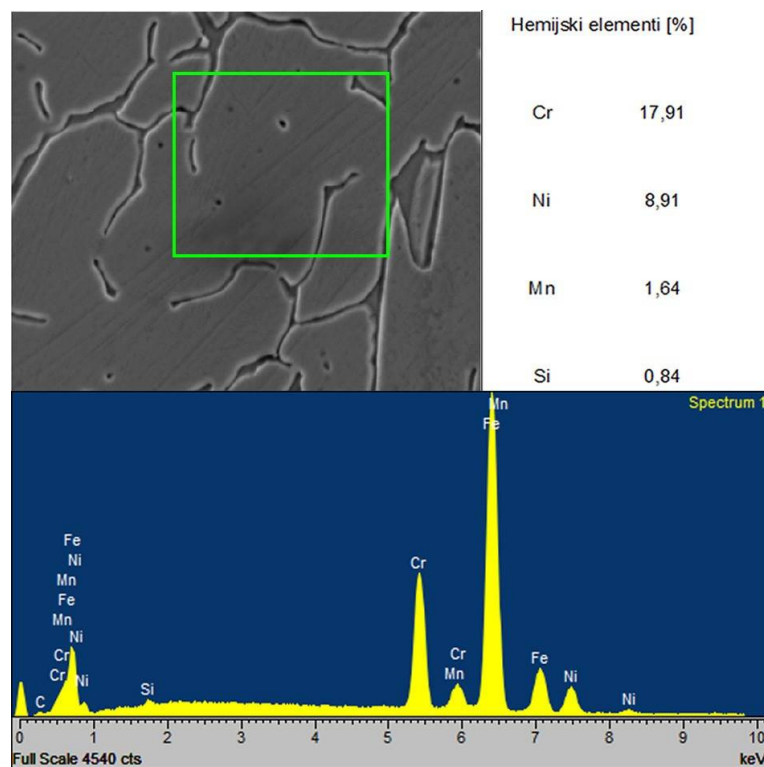
Tokom analize pripremljenih uzoraka na SEM, nisu uo eni uklju ci ili druge nepravilnosti ni greške. U metalu šava (slike 4.12a-4.17a) vidljiva je dendritska

struktura u različitim orijentacijama. U zoni stapanja (slike 4.12b-4.17b) vidljiva je austenitna mikrostruktura gde je po granici zrna došlo do izdvajanja δ -ferita (slika 4.18).



Slika 4.18 Granica oko austenitnog zrna (SEM)

Tokom procesa posmatranja uzoraka na SEM mikroskopu izvršena je i EDS analiza. Na slici 4.19 prikazana je mikrostruktura metala šava sa obeleženim mestom na kome se vršilo ispitivanje prisustva i sadržaja hemijskih elemenata. Pored mikrostrukture nalaze se detektovani hemijski elementi sa svojim udelima, dok je ispod slike mikrostrukture prikazan spektrogram (napomena: usled ograničenja metode EDS ostali prisutni elementi u AISI 304L kao što su C, S, P, N nisu mogli biti pouzdano detektovani i kvantifikovani).



Slika 4.19 EDS analiza metala šava uzorka zavarenog aktivnim premazom 5% TiO₂

U tabeli 4.4 prikazane su detektovane vrednosti hemijskih elemenata u metalu šava.

Tabela 4.4 Rezultati EDS ispitivanja

Uzorak	Hemijski elementi [%]			
	Cr	Ni	Mn	Si
OM	17,54	8,66	1,66	0,79
5% TiO ₂	17,91	8,91	1,64	0,84
4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	17,59	8,04	1,56	0,79
3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	18,7	8,2	1,55	0,81
2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	17,57	8,56	1,61	0,72
1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	17,81	8,49	1,82	0,7
5% SiO ₂	17,46	8,01	1,78	0,69

Na osnovu rezultata EDS analize može se ustanoviti da unutar metala šava nije uo ljuvo pove anja sadržaja silicijuma, kao ni titanijuma koji su sastavni elementi aktivnog premaza. Odnosno, da detektovane koli ine silicijuma odgovaraju udelu u osnovnom materijalu.

4.3 Ispitivanje hemijskog sastava

Rezultati izvršenih ispitivanja hemijskog sastava u osnovnom materijalu i u zoni metala šava na zavarenim uzorcima nalaze se u tabeli 4.5.

Tabela 4.5 Hemijski sastav dobijen na optičkom emisionom spektrometru

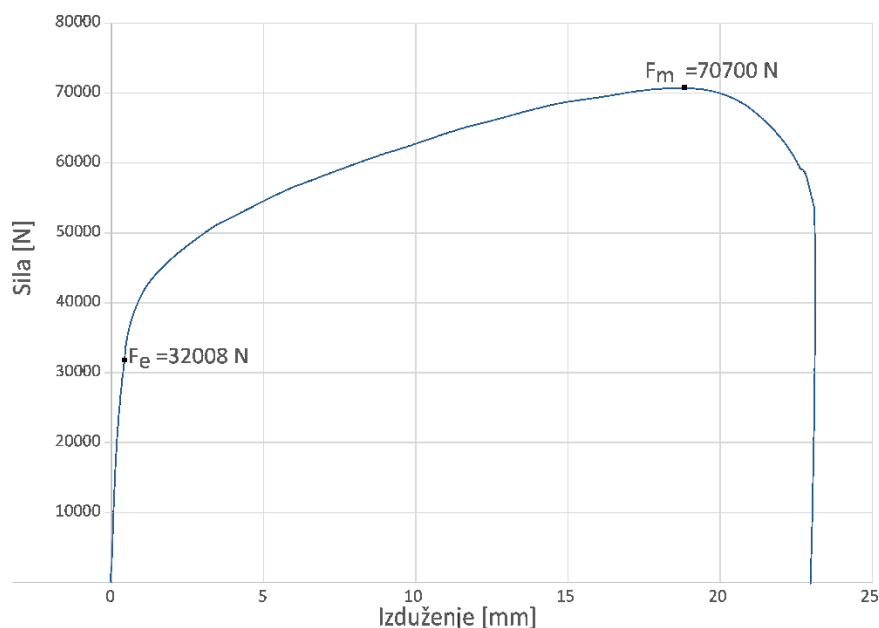
Uzorak	Hemijski elementi [%]							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Fe
OM	0,02	0,42	1,55	18,63	8,23	0,032	0,0004	Ostalo
5Ti	0,02	0,45	1,5	18,57	8,29	0,032	0,0006	Ostalo
4Ti1Si	0,02	0,45	1,51	18,55	8,24	0,032	0,0006	Ostalo
3Ti2Si	0,02	0,45	1,53	18,56	8,20	0,030	0,0007	Ostalo
2Ti3Si	0,02	0,45	1,51	18,57	8,24	0,032	0,0007	Ostalo
1Ti4Si	0,025	0,45	1,53	18,60	8,26	0,032	0,006	Ostalo
5Si	0,03	0,44	1,55	18,63	8,23	0,031	0,0004	Ostalo
Po Standardu ASTM A240/A240M	<0,03	<0,75	<2	17,5 - 19,5	8 - 12	<0,045	<0,030	Ostalo

Na osnovu rezultata hemijskog sastava iz tabele 4.5, može da se konstatuje da je hemijski sastav metala šava ispitanih uzoraka zadovoljava standardom dozvoljene vrednosti. Značajnija razlika između zavarenih uzoraka i osnovnog materijala nije uočljiva. Na osnovu rezultata može se konstatovati da nije došlo do kontaminacije metala šava, odnosno da upotreba aktivnog premaza sa 5% udela estica ne izaziva promenu hemijskog sastava metala šava. Takođe nisu pronađeni ni tragovi volframa što sugeriše da nije došlo do topljenja elektrode. Jedina primetna razlika u rezultatima hemijskog sastava je da se u uzorcima 5Si i 1Ti4Si nalazi veća količina ugljenika. Vrednosti prikazane u tabeli 4.5 su u pogledu ključnih legirajućih elemenata u skladu sa vrednostima dobijenim EDS metodom, prikazanim u tabeli 4.4.

4.4 Ispitivanje mehaničkih osobina

4.4.1 Ispitivanje zatezanjem

Na osnovu prikupljenih podataka sa kidalice, dobijeni su dijagrami zatezanja sila – izduženje: Na slici 4.20 nalazi se dijagram sila – izduženje za uzorak 5P, tipičan za sve ispitane uzorke.



Slika 4.20 Dijagram zatezanja Sila – Izduženje za uzorak 5Ti

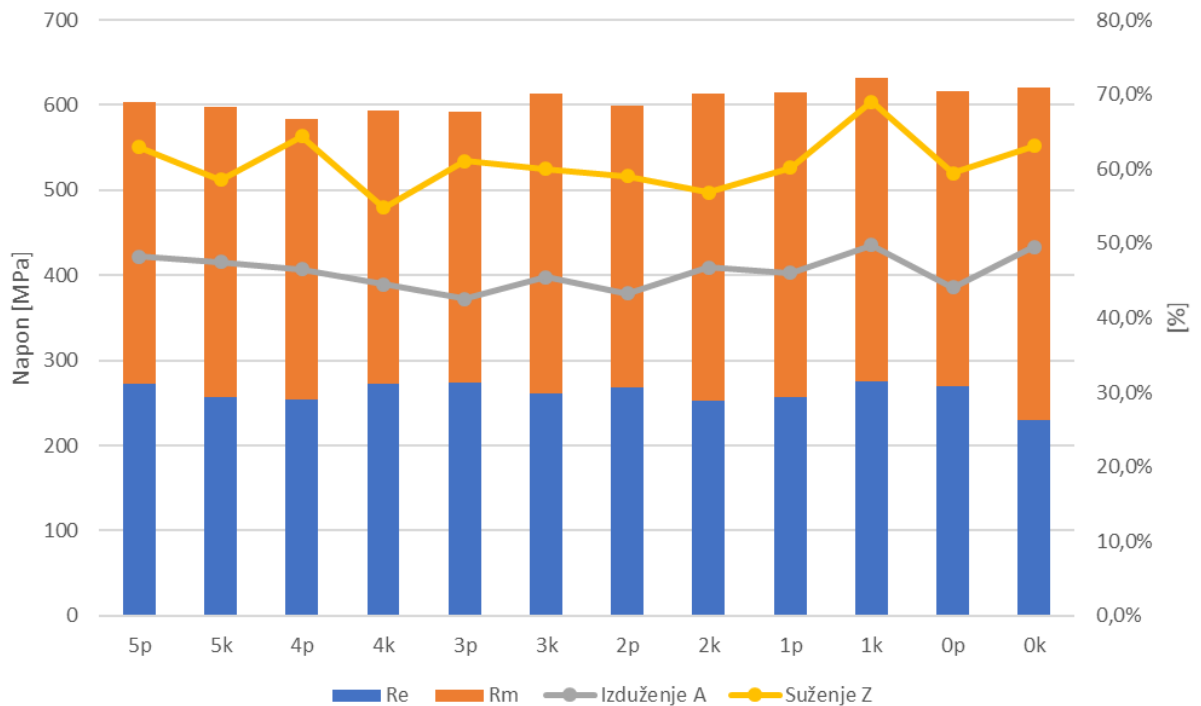
Rezultati zateznih karakteristika zavarenih uzoraka nalaze se u tabeli 4.6. Kako bi se lakše prikazale razlike u vrednostima zateznih napona, izduženja i suženja podaci iz tabele 4.6 prikazani su grafi ki na dijagramu na slici 4.21.

Do loma kod svih uzoraka je došlo u oblasti metala šava.

Tabela 4.6 Mehani ke osobine zavarenih uzoraka

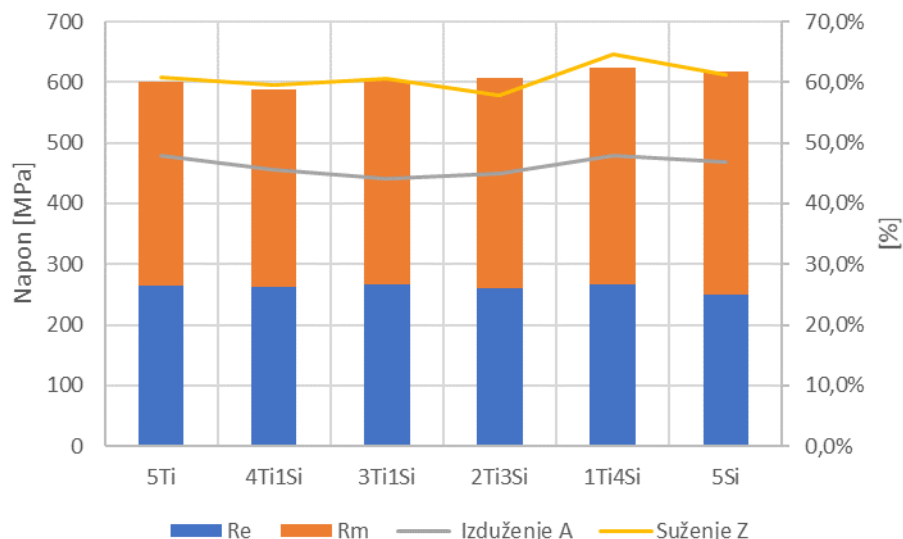
Uzorak		Napon te enje Re [MPa]	Zatezna vrsto a Rm [MPa]	Izduženje A [%]	Suženje Z [%]
5P	5% TiO ₂	273	603	48,5	63,0
5K		257	598	47,5	58,5
4P	4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	254	583	46,5	64,5
4K		272	594	44,5	55,0
3P	3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	274	592	42,5	61,0
3K		261	613	45,5	60,0
2P	2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	268	599	43,5	59,0
2K		253	614	47,0	57,0
1P	1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	257	615	46,0	60,0
1K		275	632	50,0	69,0
0P	5% SiO ₂	270	616	44,0	59,5
0K		230	621	49,5	63,0
Osnovni materijal		464	696	60	63
		484	700	55	58,5

P uzorak sa po etka plo e, K - Uzorak sa kraja plo e



Slika 4.21 Rezultati ispitivanja zatezanjem – grafi ki prikaz

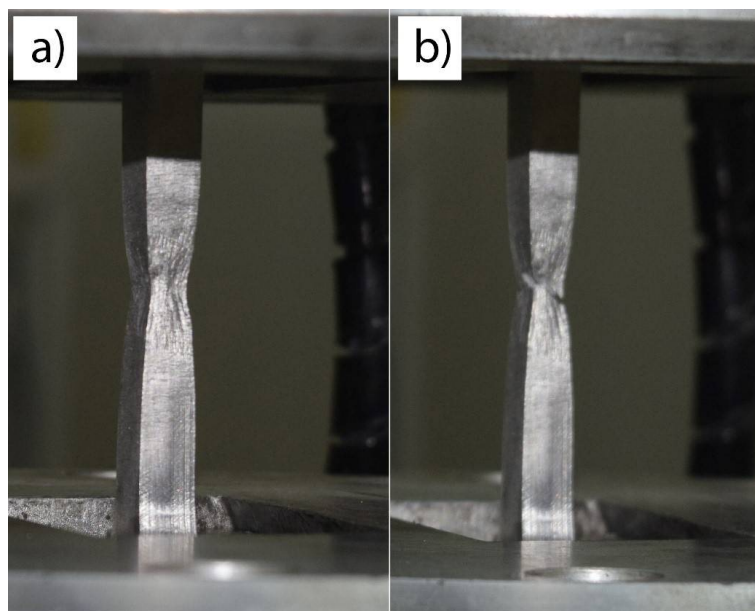
Sa dijagrama prikazanih na slici 4.21 vidi se da su vrednosti zateznih karakteristika relativno ujedna ene. Tako e može se re i da ne postoji zna ajna razlika izme u uzoraka uzetih sa po etka plo e i kraja zavarene plo e. Relativna standardna devijacija zatezne vrsto e za sve uzorke je 2,3% dok za napon te enja iznosi 5%. Najve a zatezna vrsto a i napon te enja su postignuti kod uzorka zavarenog sa aktivnim premazom na bazi mešavina estica 1% TiO_2 i 4% SiO_2 u etanolu koji je uzet sa kraja plo e odnosno iz oblasti na kojoj je širina metala šava relativno široka. Kod istog uzorka je zabeleženo najve e izduženje i suženje, verovatno kao rezultat velike zapremine metala šava.



Slika 4.22 Srednje vrednosti zateznih karakteristika – grafi ki prikaz

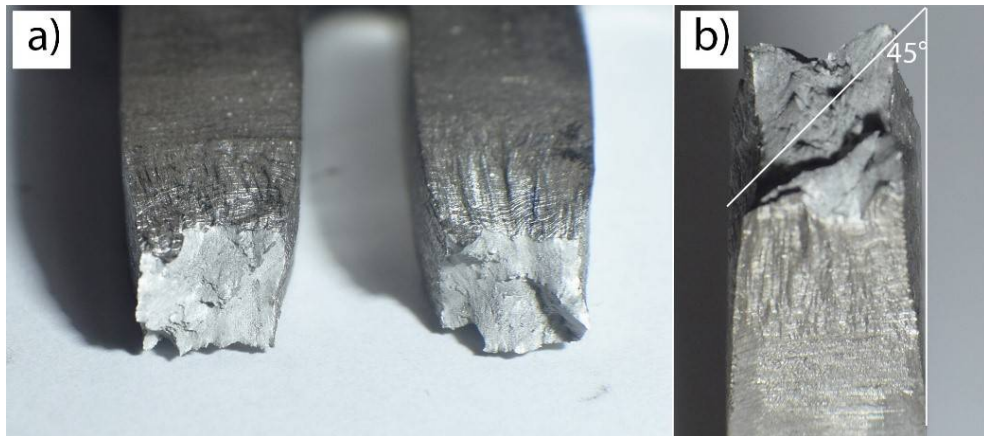
Srednje vrednosti zateznih karakteristika po uzorcima prikazani su na slici 4.22 gde se jasno može videti da je uzorak 1Ti4Si ima najveće mehaničke osobine, sledeći je uzorak 5Si, odnosno uzorak zavaren sa premazom na bazi 5% SiO₂. Međutim, kod ovog uzorka je uočen minimalni napon tečenja. Sa druge strane, najniže mehaničke osobine su uočene kod uzorka zavarenog sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 4% TiO₂ i 1% SiO₂, odnosno kod uzorka 4Ti1Si.

U procesu zatezanja, na epruvetama se po dostizanju maksimalnog zateznog napona javljalo suženje, odnosno stvaranje vrata na mestu budućeg loma. Na slici 4.23 može se videti vrat u predelu metala šava, kao i sam lom.



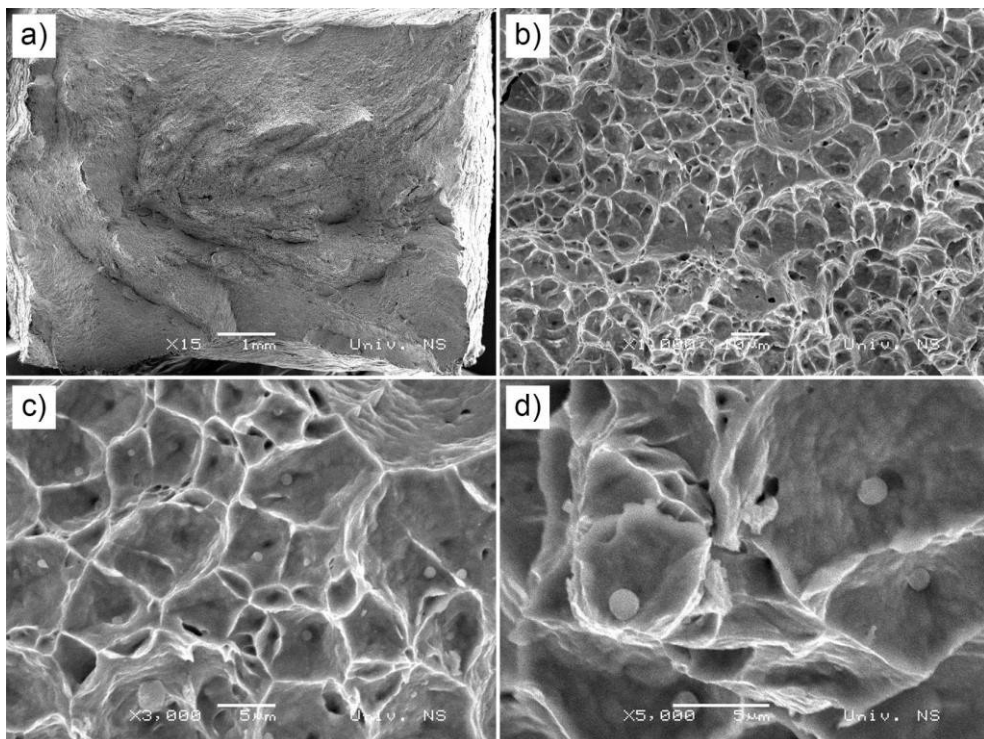
Slika 4.23 Proces zatezanja: a) vrat na epruveti, b) lom epruvete

Kod svih epruveta došlo je do stvaranja vrata što je karakteristika duktilnih materijala. Na prelomljenom metalu šava lako su uo ljivi vlaknasti tragovi te enja metala (slika 4.24a), kao i lom pod uglom oko 45° (slika 4.24b).



Slika 4.24 Prelomljena površina metala šava a) vidljivi vlaknasti tragovi b) lom pod uglom od 45°

Kako bi se ta no utvrdila morfologija loma izvršeno je ispitivanje površine loma na SEM-u. Na slici 4.25 prikazana je površina loma epruvete uzorka 4K, gde slika 4.25a predstavlja izgled makro površine loma. Slike 4.25b,c,d pokazuju morfologiju loma epruvete na kojima se vide jamice. U sredini jamica (slika 4.25d) su nemetalni uklju ci oko kojih je nastao duktilni lom. Svi uzorci imaju duktilnu morfologiju loma.

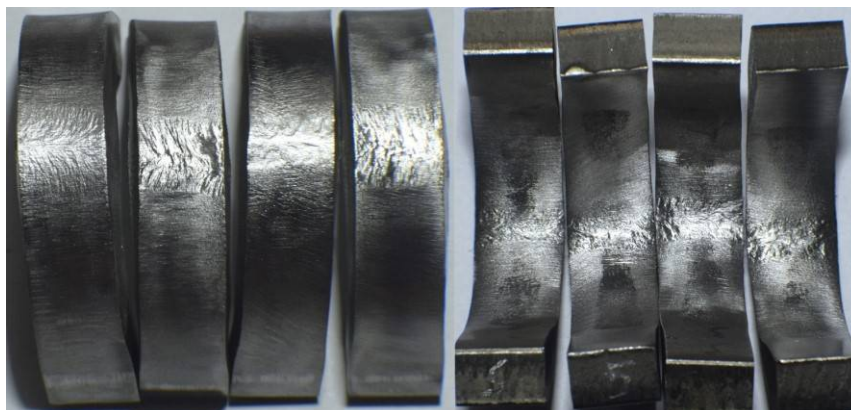


Slika 4.25 Morfologija loma uzorka zavarenog aktivnim premazom sa esticama 4% TiO_2 + 1% SiO_2 (SEM)

4.4.2 Ispitivanje savijanjem

Nakon izvršenog savijanja epruveta do 180° preko lica i korena metala šava, na epruvetama je izvršeno vizuelno ispitivanje eventualne pojave novonastalih pukotina ili prslina.

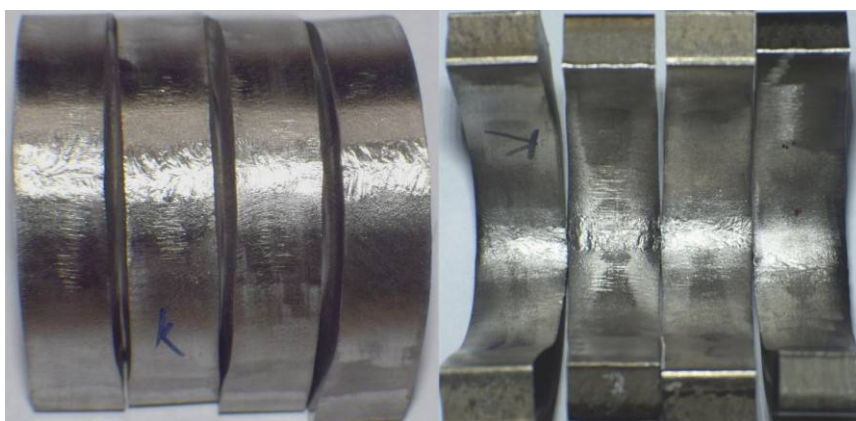
Na slikama 4.26–4.31, gde su prva i treća epruveta savijani preko lica metala šava, dok su druga i četvrta savijane preko korena metala šava.



Slika 4.26 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 5% TiO₂ nakon savijanja prikazani sa obe strane



Slika 4.27 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 4% TiO₂ + 1% SiO₂ nakon savijanja prikazani sa obe strane



Slika 4.28 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 3% TiO₂ + 2% SiO₂ nakon savijanja prikazani sa obe strane



Slika 4.29 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 2% TiO_2 + 3% SiO_2 nakon savijanja prikazani sa obe strane



Slika 4.30 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 1% TiO_2 + 4% SiO_2 nakon savijanja prikazani sa obe strane

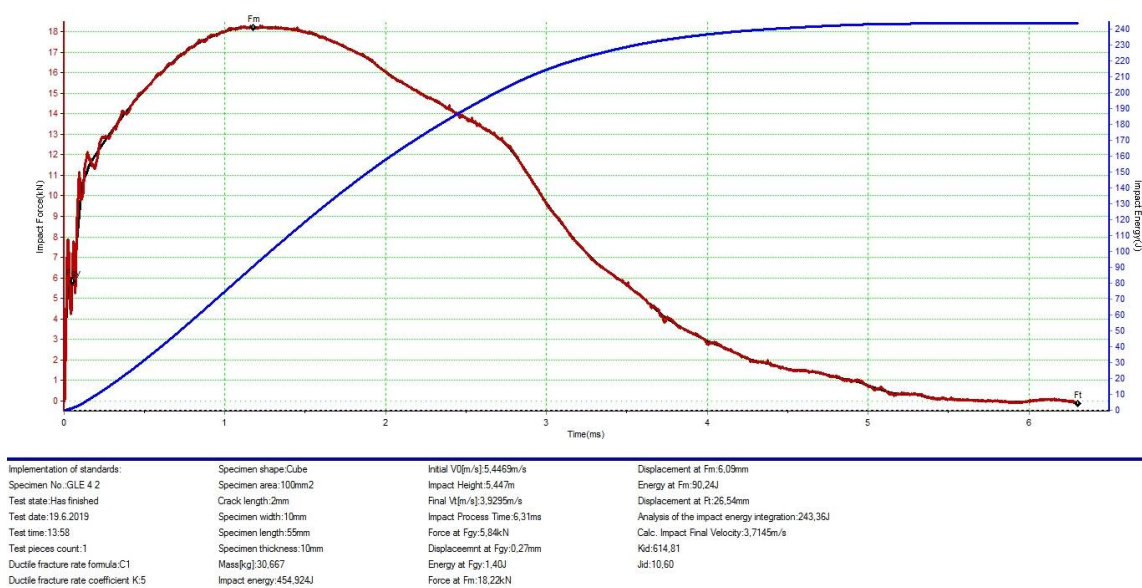


Slika 4.31 Uzorci zavareni sa aktivnim premazom 5% SiO_2 nakon savijanja prikazani sa obe strane

Iako je na savijenim epruvetama lako vidljiva oblast metala šava sa izraženim linijama te enja i deformacije metala, kod ispitivanih epruveta nije uo ena pojava ni jedne prsline. Stoga, svi zavareni uzorci zadovoljavaju standard SRPS EN ISO 5173:2010 u pogledu ispitivanja savijanjem.

4.4.3 Ispitivanje energije udara

Nakon izvršenih ispitivanja dobijene su vrednosti energije udara, kao i energije potrebne za stvaranje i širenje prsline u metalu šava. Na dijagramu (slika 4.32), dobijenom kao rezultat prikupljenih informacija sa senzora mašine, prikazane su dve krive. Crvena kriva predstavlja zavisnosti sila – vreme pri udaru epruvete gde se može videti maksimalna sila, odnosno trenutak do kada se utrošena energija troši na stvaranje prsline, i drugi deo posle najveće vrednosti, kada se energija troši na širenje prsline. Plava linija predstavlja prirast energije udara u zavisnosti od vremena.



Slika 4.32 Dijagram energije udara uzorak sa 4% TiO₂ i 1% SiO₂ – Prikaz iz programa Dyna Impact

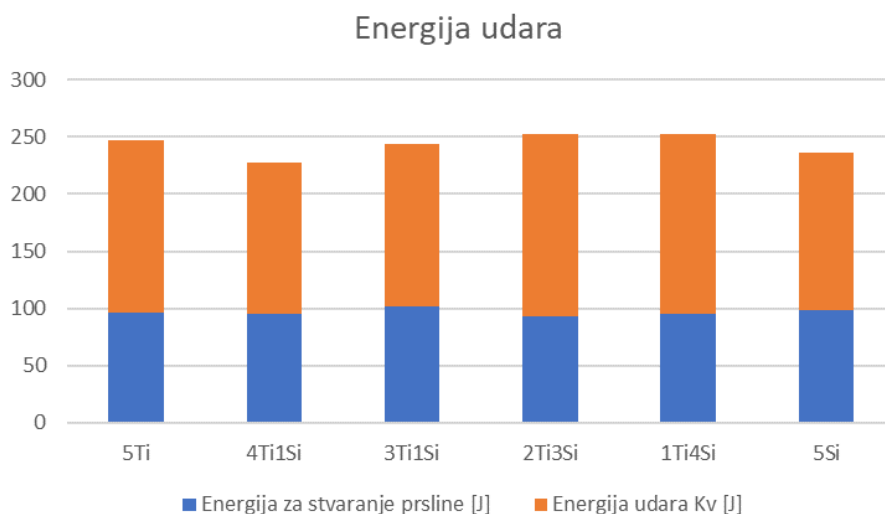
Iz podataka ispod slike 4.32, može se videti da je ukupna energija udara 243,36 J dok je energija potrebna za stvaranje prsline 90,24 J što rezultira da je energija za širenje prsline 153,12 J.

U tabeli 4.7 date su vrednosti energija udara, kao i vrednosti energije potrebne za stvaranje i širenje prsline.

Tabela 4.7 Rezultati ispitivanja energije udara u metalu šava

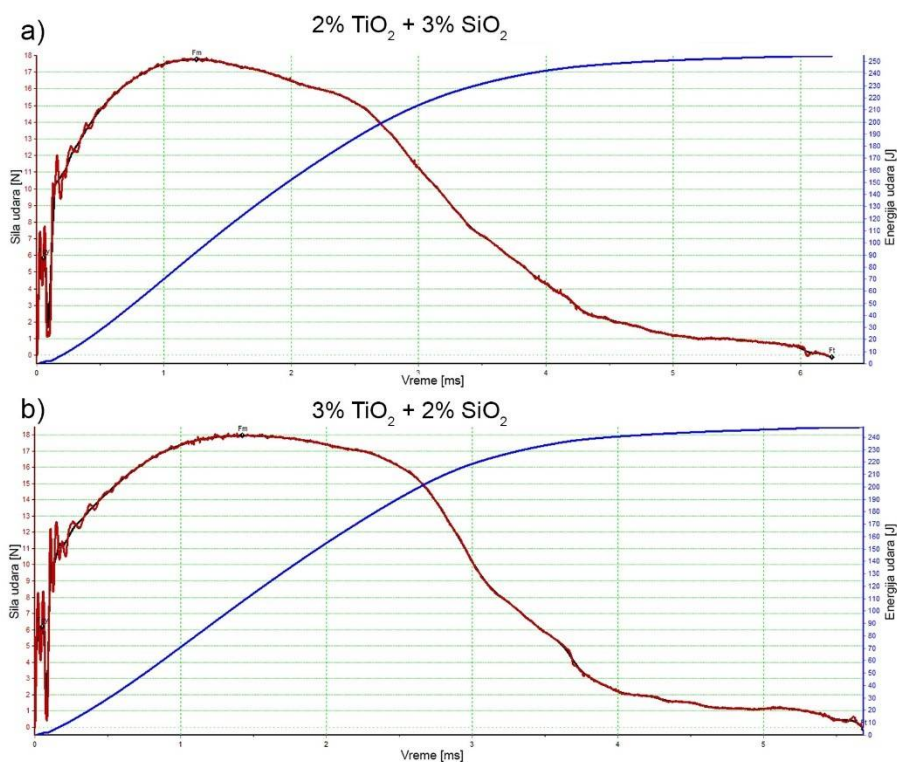
Uzorak	Epruveta	Energija za stvaranje prsline [J]	Energija za širenje prsline [J]	Ukupna energija udara KV [J]
5% TiO ₂	1	94	156	250
	2	100	150	250
	3	96	146	242
	Srednja vr.	97	151	248
4% TiO ₂ + 1% SiO ₂	1	98	117	215
	2	90	153	243
	3	99	125	223
	Srednja vr.	96	132	227
3% TiO ₂ + 2% SiO ₂	1	100	152	252
	2	100	131	231
	3	108	141	248
	Srednja vr.	102	141	244
2% TiO ₂ + 3% SiO ₂	1	92	162	254
	2	86	152	238
	3	100	165	265
	Srednja vr.	93	160	253
1% TiO ₂ + 4% SiO ₂	1	94	168	262
	2	97	154	251
	3	95	150	245
	Srednja vr.	95	157	253
5% SiO ₂	1	102	137	239
	2	93	125	219
	3	102	148	250
	Srednja vr.	99	137	236
Osnovni materijal	1	105	153	258
	2	111	171	282
	3	106	173	279
	Srednja vr.	107	166	273

Vrednosti dobijenih energija su predstavljene i na grafi kom prikazu na slici 4.33.



Slika 4.33 Vrednost energije udara u metalu šava – grafi ki prikaz

Najve a vrednost energije udara je postignuta kod uzoraka 1Ti4Si i 2Ti3Si, odnosno uzorci zavareni sa aktivnim premazom sa mešavinom estica 1% TiO₂ i 4% SiO₂ i sa mešavinom estica 2% TiO₂ i 3% SiO₂ u etanolu. Uzorak 3Ti2Si imao je najve u vrednost energije za stvaranje prsline na vrhu V zarez, ali i relativno nisku vrednost energije udara. Na slici 4.34 prikazani su dijagrami energija udara na kojima se može videti razlika izme u uzorka 2Ti3Si i 3Ti2Si, jer je energija udara u stvari površina ispod krive sila – vreme.



Slika 4.34 Dijagrami energije udara: a) uzorak zavaren sa aktivnim premazom 2% TiO₂ + 3% SiO₂, b) uzorak zavaren sa aktivnim premazom 3% TiO₂ + 2% SiO₂

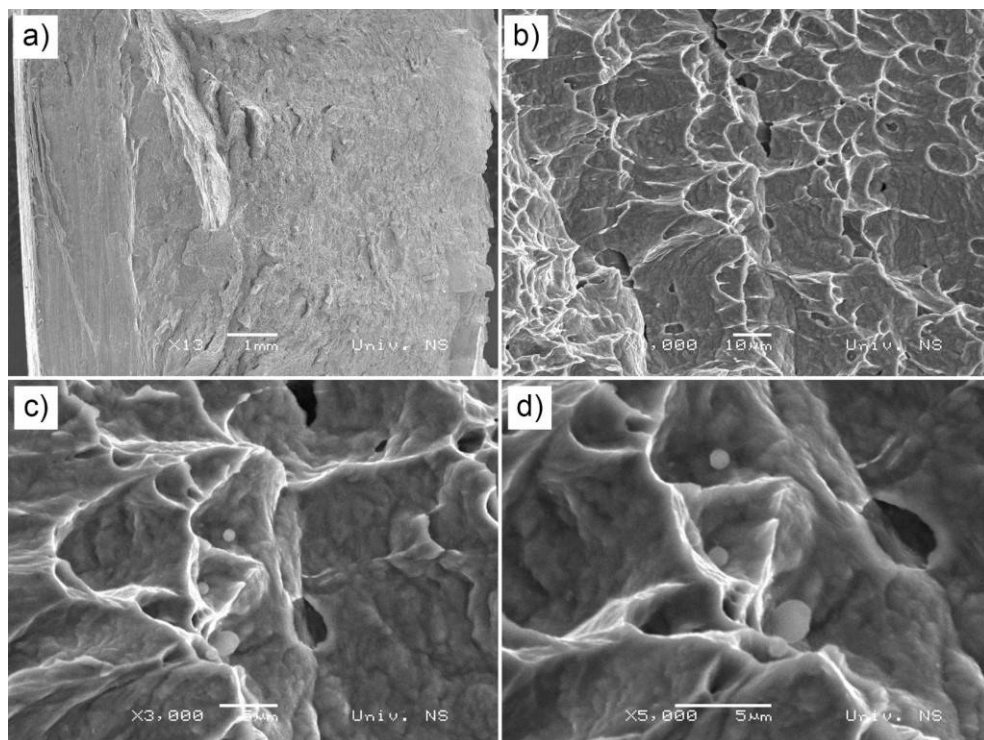
Standardom SRPS EN 10088-2:2003 najmanja propisana vrednost energije udara na sobnoj temperaturi sa zarezom postavljenim u položaj VWT po standard SRPS ISO 9016:2013 je 100 J. Na osnovu standardom propisane vrednosti svi višestruko prelaze najmanju vrednost energije udara.



Slika 4.35 Prelomljena površina uzorka 1Ti4Si

Na slici 4.35 prikazana je površina loma uzorka 1Ti4Si na kojoj se mogu videti tragovi plasti ne deformacije nastali prilikom loma epruvete. Kod svih ispitanih uzoraka uo lživ je duktilni lom.

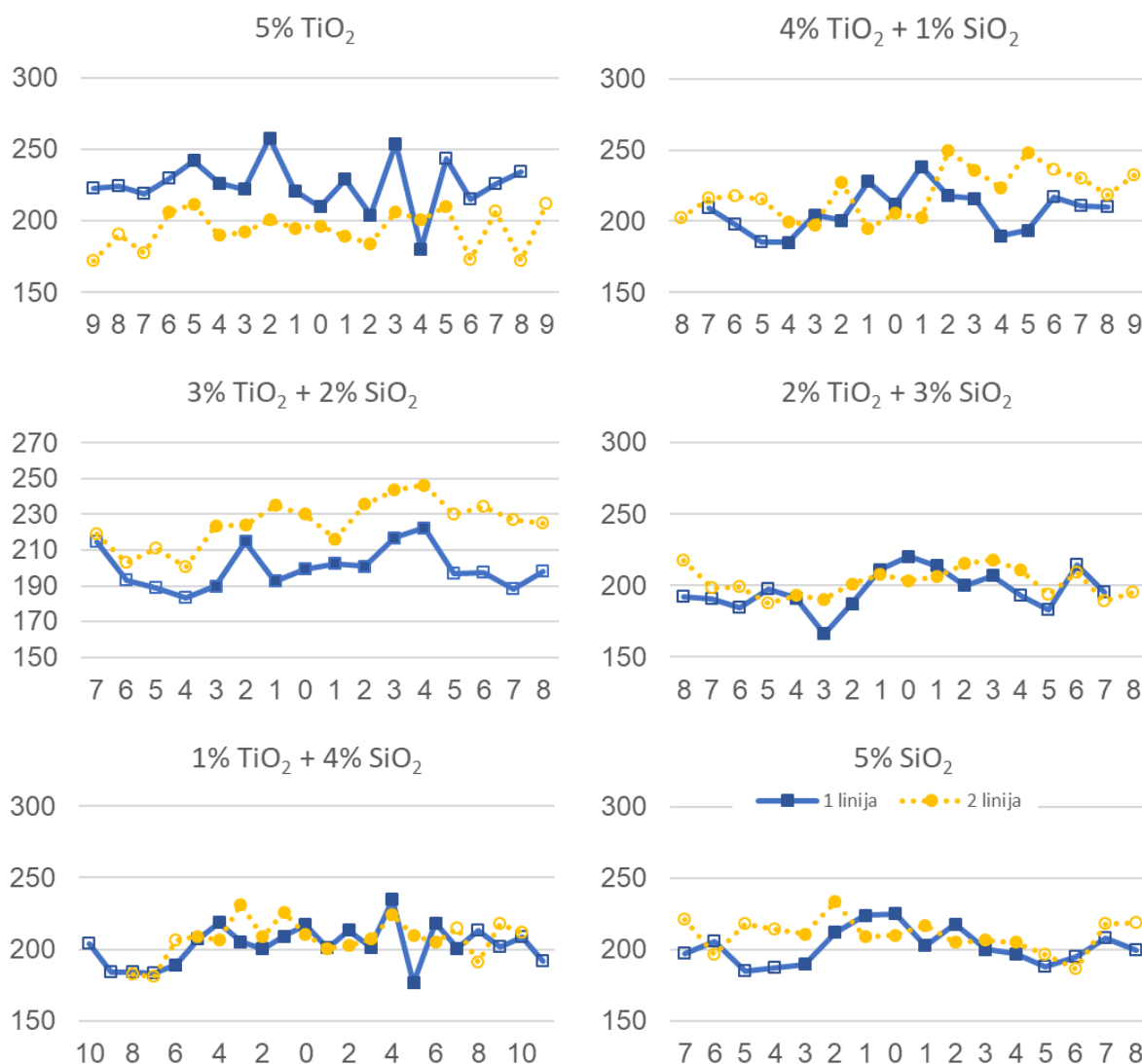
Ispitivanjem površine loma epruveta za energiju udara na SEM-u, može da se konstatuje da je kao i kod ispitivanja zatezanjem, prisutan duktilni lom sa izrazito jami astom morfologijom, slika 4.36. Ovaj rezultat je u potpunosti u skladu sa makro karakteristikama duktilnog loma datih na slici 4.35, od kojih je najvažnija pojava intenzivne plasti ne deformacije.



Slika 4.36 Morfologija loma uzorka zavarenog sa premazom 1% TiO₂ 4% SiO₂ (SEM)

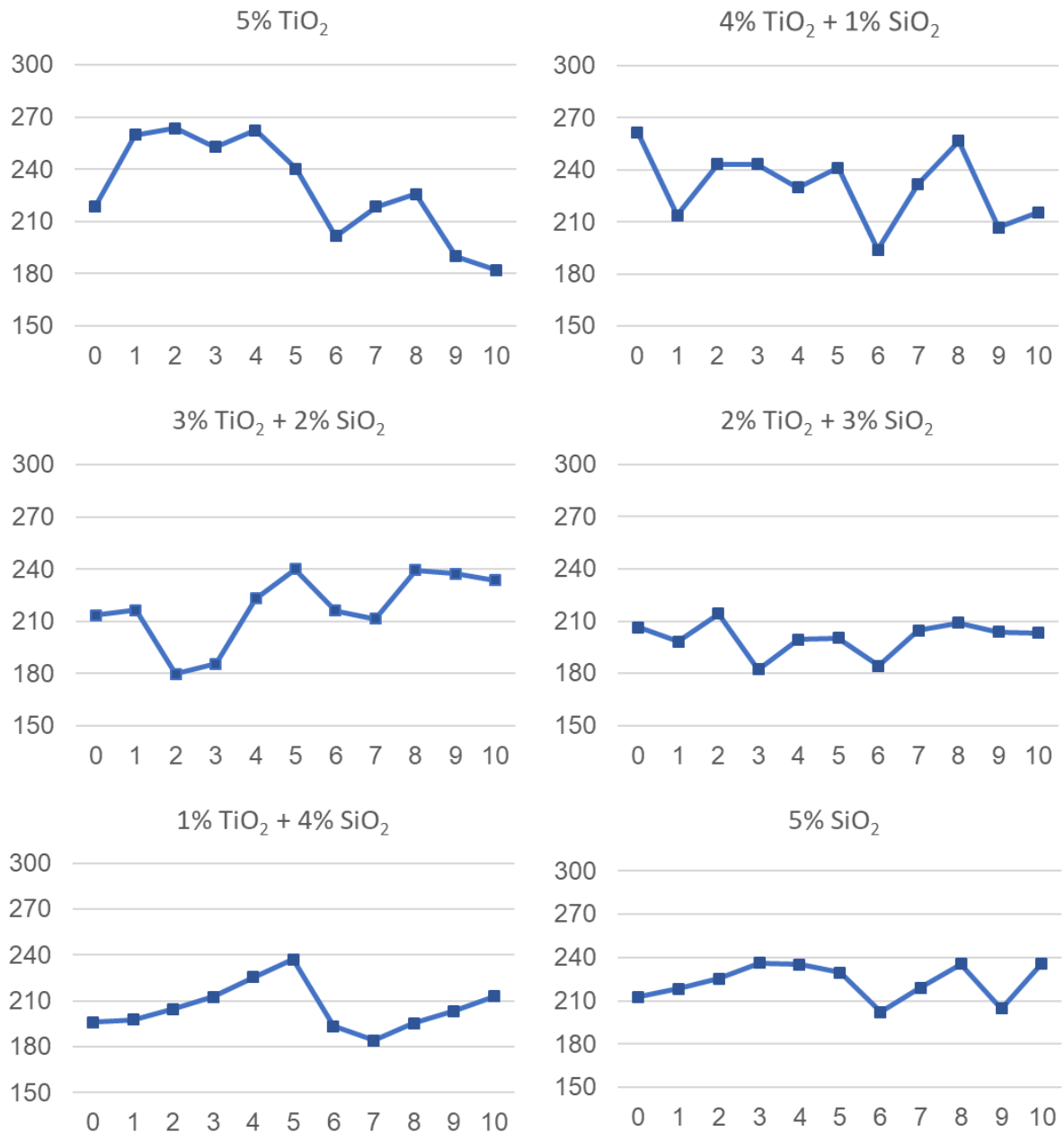
4.4.4 Ispitivanje mikrotvrdo e

Rezultati ispitivanja mikrotvrdo e HV0,1 (ispitani na svim uzorcima u tri linije, kao što je opisano na slici 3.64), prikazani su na slikama 4.37 i 4.38. Broj otisaka na uzorcima se razlikuje, jer širina metala šava nije ista kod svih uzoraka. Pune oznake (i) predstavljaju merenje u metalu šava, a prazne oznake (i) u osnovnom materijalu.



Slika 4.37 Profil mikrotvrdo e na zavarenim uzorcima po liniji 1 i liniji 2

Sa profila mikrotvrdo e za linije merenja 1 i 2 može se ustanoviti da je mikrotvrdo a po obe linije relativno ujedna ena kod uzoraka 4Ti1Si, 2Ti3Si, 1Ti4Si i 5Si. Kod uzorka 5Ti izmerena mikrotvrdo a sa donje strane uzorka je niža za oko 20 Vikersa u odnosu na liniju sa lica šava, dok kod uzorka 3Ti2Si dobijene vrednosti tvrdo e su ve e sa korene strane. Ukoliko bi posmatrali samo sredinu metala šava kod svih uzoraka je mikrotvrdo a ve a sa strane lica (linija 1), osim kod uzorka 3Ti2Si i delom kod uzorka 4Ti1Si.



Slika 4.38 Profili mikrotvrdo e po vertikalnoj liniji 3

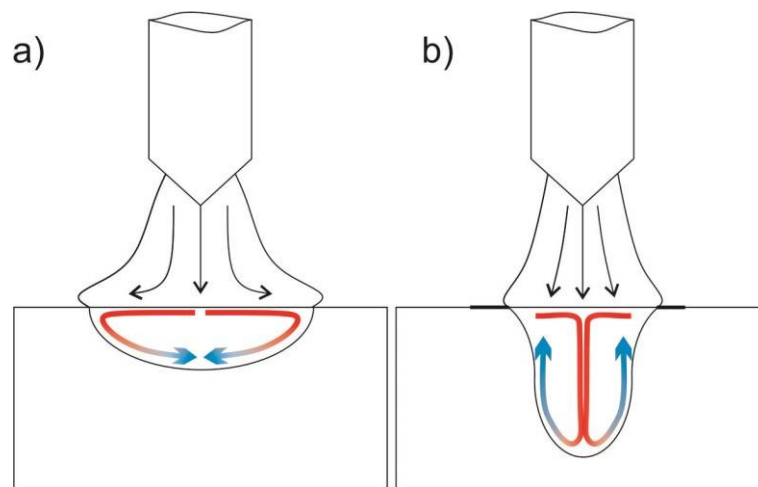
Na osnovu profila mikrotvrdo e za liniju merenja 3 (slika 4.38) za uzorke 4Ti1Si, 2Ti3Si, 1Ti4Si i 5Si može se re i da su ravnomerne i da srednja vrednost izmerenih mikrotvrdo a odgovara srednjim vrednostima mikrotvrdo e za linije 1 i 2. Dok kod uzorka 5Ti dolazi do pada tvrdo e sa udaljavanjem od lica metala šava ka korenu što se poklapa sa vrednostima tvrdo e za liniju 2 koje su niže. Kod uzorka 3Ti2Si dolazi do porasta tvrdo e i odgovara liniji 2 koja ima ve e vrednosti tvrdo e u korenom delu.

5 Diskusija

5.1 Uvodna istraživanja

U procesu uvodnih istraživanja potrebno je pravilno odabrati komponente i na in pravljenja premaza kako bi se dobila najveća dubina uvara sa zadovoljavajućim kvalitetom zavarenog spoja.

Kako je u poglavlju 2.3.1 opisano, aktivni premaz ima ulogu da izazove Marangonijev efekat koji bi promenio pravac strujanja te nog metala [4, 8, 31, 35], time bi se doprinelo povećanju dubine uvara, odnosno, da utiče na suženje električne nog luka (slika 5.1).



Slika 5.1 Kretanje te nog rastopa i oblik el. luka: a) bez aktivnog premaza, b) sa aktivnim premazom

Da bi do promene smeru kretanja rastopljenog metala došlo potrebno je da se rastopu metala doda količina kiseonika od 150 do 350 ppm [61] koji bi u reakciji sa rastopom izazvao promenu toplotnog koeficijenta površinskog napona. Kiseonik nastaje tokom razlaganja aktivnog premaza (koji je na bazi oksida) zbog velike temperature električne nog luka, dok preostali atomi isparavaju i prave elektronski oblak oko električne nog luka i time sužavaju električni luk.

Prvi problem je pravilan odabir estica, kao i odnosa estica u rastvaraču. U naučnim radovima SiO_2 i TiO_2 se često koriste [36, 52, 53, 55], mada su mnogo češće složene mešavine oksida i halida u različitim rastvaračima i odnosima [6, 25, 41, 51, 58]. Pregledom literature ustanovljeno je da je procentualni odnos estica i rastvarača često podjednak (1:1), usled čega su dobijeni aktivni premazi u obliku paste. Stoga je bilo potrebno naći adekvatan odnos za date estice kako bi se nakon nanošenja, na površini materijala našla dovoljna količina aktivnih estica da izazovu Marangonijev efekat. U radu [59] ustanovljeno je da sa porastom debljine premaza, odnosno udela estica većeg od određene vrednosti, dolazi do blagog smanjenja dubine uvara.

5.1.1 Eksperiment I – Određivanje uticaja masenog udela estica TiO_2 u aktivnom premazu na dubinu uvara

U prvom eksperimentu urađeno je određivanje masenog udela estica TiO_2 veličine 300 nm u etanolu. Nakon izvršenih ispitivanja sa udelima 5, 10 i 20% ustanovilo se da 5% masenog udela estica u aktivnom premazu daje najveću dubinu uvara za uslove nanošenja etnikom u jednom prolazu pri datim parametrima pretapanja. Sa 5% udela korišćenih estica oksida postignuta je dovoljna količina kiseonika za izazivanje Marangonijevog efekta [61], a daljim porastom udela estica dolazi do slabljenja ovog efekta [59]. Drugi od mogućih razloga je što se veći udeo energije električnog luka troši na topljenje veće količine estica.

5.1.2 Eksperiment II – Određivanje uticaja rastvarača

U sledećem eksperimentu aktivne estice TiO_2 rastvarane su u etanolu ili acetonu kako bi se uvideo uticaj rastvarača na povećanje dubine uvara. U literaturi su ova dva rastvarača isto korišćena [6, 7, 9, 25, 26, 41, 55, 56]. Nakon izvršenih eksperimenata veća dubina uvara je postignuta upotrebom acetona, međutim razlika u dubinama je relativno mala i iznosi manje od 2%.

5.1.3 Eksperiment III – Određivanje uticaja oblika vrha elektrode i udela nano i submikronskih estica TiO_2

Naredni eksperiment je urađen sa esticama TiO_2 veličine 20 nm i esticama submikronske veličine 300 nm, kao i mešavinama ovih estica do masenog udela od 5% u rastvoru acetona. Pored aktivnog premaza varirana su i tri oblika elektrode: ravna odnosno tupa, naoštrena konusna sa uglom 90° i konusna elektroda sa uglom 90° i zatupljenjem na vrhu prečnika 0,5 mm.

Rezultati ispitivanja dubine uvara kod uzoraka pretopljenih upotrebom aktivnog premaza su do 100% bolji nego bez upotrebe aktivnog premaza. Dubine uvara i odnosa D/\dot{S} pri upotrebi aktivnog premaza pokazali su da su nano estice efikasnije od submikronskih, ali najbolji rezultati su postignuti njihovim mešavinama. Tseng i Lin su u radu [55] takođe pokazali, da su nano estice efikasnije od mikro, ali sa esticama SiO_2 . Ova pojava se objašnjava činjenicom da se pri dejstvu električnog luka zagrevanje i isparavanje sitnijih estica odvija brže i lakše u odnosu na veće estice zbog veće površinske mase nano estica u odnosu na mikronske. Međutim, nominalna veličina estica u polaznom prahu od kojih je napravljen aktivni premaz ne odgovara veličini estica u aktivnom premazu prema merenjima krupno estica u rastvoru (slika 3.14, strana 48). U rastvoru se javljaju aglomerati estica koje su višestruko veće dimenzija od nominalne veličine estica praha. Najmanje estice izmerene su kod mešavina submikronskih i nano estica gde najverovatnije krupnije estice izazivaju razbijanje aglomerata nano estica [62], odnosno razbijanje slabih Van der Waals-ovih veza [63–65] i time smanjuju veličinu oksida u aktivnom premazu. Na osnovu toga, istu površinu aktivnog premaza pokriva veći broj sitnijih estica, čime se utiče na povećanje dubine uvara.

Sa druge strane, i oblik vrha elektrode ima uticaj na dubinu uvara. Elektroda sa tupim vrhom se pokazala kao najlošija, odnosno sa njom su postignute najmanje vrednosti dubina uvara. Po Key [19] tupa elektroda ima uzak elektri ni luk, a time se dobija uzak i dubok uvar, dok elektrode sa konusnim vrhom imaju ve u širinu i manju dubinu zavara zbog širenja elektri nog luka. Pri upotrebi aktivnog premaza rezultati su druga iji, jer tupa elektroda zahvata manju površinu aktivnog premaza pa je samim tim manja koli ina isparenih oksida koja je nedovoljna da izazove pove anje dubine uvara. Najve a dubina uvara postignuta je sa konusnom elektrodom sa zatupljenim vrhom, jer ima širi elektri ni luk od tupe elektrode, a sa druge strane, koncentrisaniji elektri ni luk od elektroda sa oštrim vrhom. Me utim, ocenjeno je da je razlika izme u dubine uvara dobijene sa elektrodom sa konusnim i konusnim, i zatupljenim vrhom relativno mala, te je zbog jednostavnijeg oštrenja konusne elektrode upravo sa takvom elektrodom nastavljen eksperimentalni rad. Naime, sam proces oštrenja elektrode i pravljenje zatupljenja adekvatnog i ponovljivog pre nika na vrhu je relativno složen.

5.1.4 Eksperiment IV – Odre ivanje uticaja nano estica SiO₂ i tipa rastvara a

Odre ivanje udela nano estica SiO₂ veli ine 40 nm u rastvoru acetona i etanola je izvršeno u eksperimentu IV.

Nakon pretapanja i makro pregleda popre nih preseka ustanovilo se da je razlika izme u dubine uvara postignuta sa aktivnim premazom u odnosu na uzorak bez aktivnog premaza ve a od 100% i u najboljem slu aju ona iznosi 140%. Najve e dubine uvara su postignute sa aktivnim premazom rastvorenim u etanolu. Aktivni premaz rastvoren u acetonu rezultovao je ve om dubinom uvara samo kod uzorka sa 20% estica, me utim odnos D/Š je niži nego kod uzorka pretopljenog sa aktivnim premazom rastvorenim u etanolu. Najve a postignuta dubina, a ujedno i odnos D/Š je na uzorku sa aktivnim premazom od 5% estica rastvorenim u etanolu, slede i po dubini uvara je uzorak sa aktivnim premazom od 40% estica SiO₂. Razlika u dubini uvara izme u ova dva premaza je 2%, me utim udeo estica za pravljenje je osam puta ve i, a samim tim i cena proizvodnje premaza sa 40% estica SiO₂. Pored toga, aktivni premaz sa 40% estica je u formi paste i teško je izvršiti njegovu homogenizaciju sa etanolom.

U uvodnom eksperimentu II sa esticama TiO₂ kao pogodniji rastvara pokazao se aceton sa 2% ve om dubinom uvara u odnosu na etanol, dok se sa esticama SiO₂ kao rastvara bolje pokazao etanol sa prose no 5% ve om dubinom uvara. Tokom izrade eksperimenta III ustanovljeno je da aceton brzo isparava što dovodi do promene odnosa estica i rastvara a u suspenziji u posudi sa aktivnim premazom. Zbog toga je etanol pogodniji izbor za rastvara jer napon pare acetona na sobnoj temperaturi iznosi 24,598 kPa, dok napon pare etanola na sobnoj temperaturi iznosi 5,78 kPa, na osnovu toga aceton ima etiri puta ve u brzini isparavanja [66].

5.1.5 Eksperiment V – Određivanje uticaja udela nano estica TiO_2 i SiO_2

Na osnovu prethodnih rezultata da se sa 5% rastvorom, kod obe vrste nano estica postižu najveće dubine uvara, u eksperimentu V izvršeno je mešanje estica TiO_2 i SiO_2 , a kao rastvarač je korišćen etanol.

Nakon izvršenih ispitivanja ustanovljeno je da je sa esticama TiO_2 postignuta veća dubina uvara u odnosu na estice SiO_2 . Ovakvi rezultati nisu u skladu sa istraživanjima Venkatesana [41, 67] koji je dobio da su za iste parametre pretapanja estice SiO_2 efikasnije za povećanje dubine uvara. Povećana dubina uvara upotrebom SiO_2 može se objasniti većom elektronegativnošću Si koji po Paulingovoj skali ima vrednost 1,90, dok Ti ima vrednost 1,54 [4, 36]. Dobijeni rezultati u eksperimentu V mogu se objasniti na osnovu rezultata merenja veličine estica u aktivnom premazu (zetasiser, slika 3.28, strana 58) koji pokazuju da je kod estica SiO_2 došlo do izraženije aglomeracije nego kod TiO_2 . Broj najsitnijih estica u opsegu 0,3 do 1 μm je 80% od ukupnog broja detektovanih estica kod aktivnog premaza sa 5% SiO_2 , dok je kod premaza sa 5% TiO_2 taj procenat 90%. Na osnovu toga se može reći da je zbog sitnijih estica TiO_2 (sa relativno većom aktivnom površinom) došlo do isparenja većeg broja elektrona koji su poboljšali dubinu uvara. Naime, estice SiO_2 su bile veličine 40 nm, a estice TiO_2 su bile veličine 20 nm. Međutim, najmanje detektovane estice u aktivnom premazu su 300 nm što je višestruko veće od nominalnih vrednosti, i što ukazuje na intenzivnu aglomeraciju.

Najveća dubina uvara je postignuta sa mešavinom estica 3% TiO_2 i 2% SiO_2 kod kojih je detektovan i najveći udeo najsitnijih estica od 91,57%. Do usitnjavanja estica moglo je doći usled mešanja i međusobnog sudaranja estica TiO_2 i SiO_2 [62]. Međutim, još jedan razlog za sitnije estice je u tome što je sklonost mešavina nano estica ka aglomerisanju manja [68]. Dobijeni rezultati u eksperimentu su u skladu sa istraživanjem Venkatesana [41, 67] gde je pokazano da se samo sa jednom vrstom estica ne može dobiti najveća dubina uvara.

5.1.6 Eksperiment VI – Određivanje uticaja brzine pretapanja

U narednom uvodnom eksperimentu VI ispitivan je uticaj brzine pretapanja, sa aktivnim premazom 5% SiO_2 , kao i razlika u odnosu na uzorke bez premaza. Brzina pretapanja je smanjivana sa 90 mm/min do 60 mm/min.

Na makro poprečnim presecima uzorka (slike 3.37 i 3.38, strana 65) vidljivo je povećanje dubine od 130 do 150% sa upotrebom aktivnog premaza. Sa smanjenjem brzine pretapanja sa 90 mm/min na 60 mm/min pri upotrebi premaza dubina uvara se povećala za 18%, a smanjenjem brzine 100 mm/min iz eksperimenta V sa aktivnim premazom 5% SiO_2 na 60 mm/min dubina uvara se povećala za 50%. Smanjenjem brzine zavarivanja povećava se količina unosa toplote, jer elektroda duže vremena provede na datoj dužini, samim tim postiže se veća količina rastopa metala i trajanje povoljnog kretanja rastopa je duže [24, 45].

5.1.7 Eksperiment VII – Određivanje uticaja ugla vrha elektrode pove anog pre nika

Na osnovu prikupljenih informacija iz prethodnih eksperimenata odabrani su parametri zavarivanja i aktivnog premaza mešavine estica 3% TiO₂ i 2% SiO₂ u etanolu sa kojima je urađen eksperiment VII. Jačina struje je limitirana aparatom za zavarivanje od 300 A. Međutim za jačinu struje iznad 200 A, po preporukama proizvođača netopljivih elektroda, potrebno je koristiti elektrode većeg prenika, tj. prenika 3,2 mm. Sa promenom prenika elektrode potrebno je korigovati i ugao vrha elektrode radi dobijanja maksimalne dubine uvara.

Nakon pripreme poprečnih preseka uzorka (slika 3.40) ustanovljena je potpuna penetracija uzorka debljine 14,4 mm sa oštrom elektrodom ugla vrha 60° pri brzini pretapanja 40 mm/min. Ostvaren odnos D/Š sa elektrodom ugla 60° je 1,18. Međutim dubina provara je postignuta nakon 90 mm pretapanja, kada je materijal bio dovoljno predgrejan, pri čemu nastaje prokapljina visine 0,4 mm. Napominje se da je dubina uvara od 12 mm postignuta u patentu US8097826 [57], ali pri procesu zavarivanja na materijalu AISI 316L sa jačinom struje 325A, dok je u ovom eksperimentu postignuta dubina uvara od 14,4 mm pri jačini struje od 300 A. Kod elektrode sa uglom vrha od 45° u uvodnom eksperimentu VII postignuta je dubina uvara od 11,66 mm, ali i velika širina šava zbog rasipanja električnog luka, što uzrokuje odnos D/Š od 0,79. Elektroda sa uglom vrha 90° ima skocentrisaniji električni luk, ali pri toj širini luka ne pretapa dovoljnu površinu aktivnog premaza, pa nema dovoljne količine kiseonika da u potpunosti preokrene smer kretanja tečnog metala.

5.2 Završna istraživanja

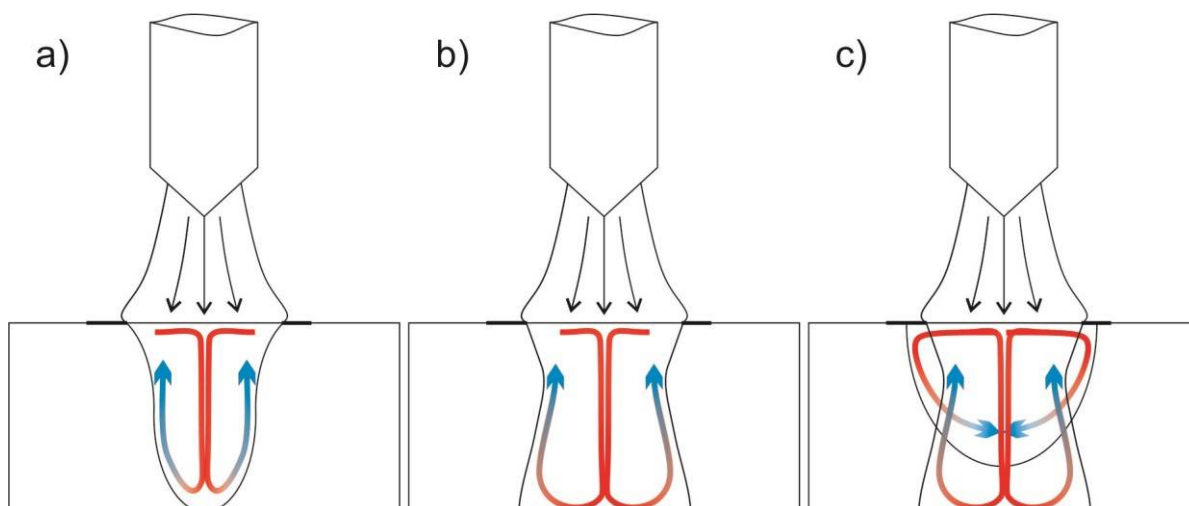
5.2.1 Vizuelna kontrola i makro ispitivanje

Kako bi se ustanovio uticaj aktivnog premaza na kvalitet zavarenog spoja pri zavarivanju A-TIG postupkom u jednom prolazu izvršeno je zavarivanje ploča debljine 10 mm sa jačinom struje od 250 A, brzinom zavarivanja 40 mm/min sa upotrebom aktivnih premaza na bazi mešavine estica TiO₂ i SiO₂. Odabir parametara i debljine materijala je izvršen na osnovu prikupljenog iskustva iz preliminarnih eksperimenata. Kako bi se eliminisale velike prokapljine korišćene su keramičke podložne ploče. Za zavarivanje je korišćen isti aktivni premaz kao u eksperimentu V, nano estice TiO₂ i SiO₂.

Nakon izvršenog zavarivanja ustanovljen je potpuni provar kod svih uzoraka, osim na uzorku zavarenim sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 1% TiO₂ i 4% SiO₂ na dva mesta u dužini od 3 mm i 4 mm (slika 4.1, strana 80). Uočena greška spada u kratke prsline i dozvoljena je po standardu SRPS EN ISO 5817:2015 za nivo kvaliteta D, ali ne za B i C. Na istom uzorku postignut je najnepovoljniji odnos D/Š (tabela 4.3), takođe je bilo potrebno najveće rastojanje od uspostavljana električnog luka kako bi se postigao potpuni uvar. Na osnovu tabele 4.1 (strana 81) vidi se da uzorci sa udelom

TiO₂ više od 3% u premazu imaju najkraće rastojanje do postizanja punog provara. Najveća vrednost od 6,4 mm ima uzorak zavaren sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 4% TiO₂ i 1% SiO₂.

U eksperimentu VII kod uzorka sa potpunim provarom od 14 mm oblik metala šava je imao oblik kao na slici 5.2a, gde suženje na korenoj strani predstavlja trenutak nestajanja energije za dalje napredovanje, odnosno predstavlja maksimum za date parametre. Pri zavarivanju ploča od 10 mm, oblik metala šava kod većine uzoraka je kao na slici 5.2b na osnovu koje se može videti da je u korenom delu povećana širina metala šava. Ovo ukazuje da datim parametrima moguće zavariti deblju ploču, odnosno ima mogućnosti za smanjenje jačine struje zavarivanja ili povećanje brzine zavarivanja. Uzorak 1Ti4Si ima oblik šava kao na slici 5.2c. Na osnovu ovakvog oblika šava dolazi se do pretpostavke da dati premaz (1% TiO₂ i 4%SiO₂) ne uzrokuje nastanak dovoljne količine kiseonika za rastopljeni metal da bi se trajno zadržao smer kretanja koji obezbeđuje maksimalnu dubinu uvara.



Slika 5.2 Modeli kretanja te nog metala: a) nedostatak energije za dalje napredovanje, b) višak energije, c) nedovoljno energije za održanje Marangonijevog efekta

5.2.2 Mikroskopska ispitivanja

Na osnovu prikazane mikrostrukture na slikama 4.4–4.17 (strana 84), dobijene svetlosnim mikroskopom i skeniranjem elektronskim, nisu uočene značajne međusobne razlike između uzoraka zavarivanih različitim aktivnim premazima. Mikrostruktura osnovnog materijala nakon zavarivanja je ostala nepromenjena, dok se u metalu šava javlja dendrična struktura uobičajena za zavarivanje neravnog elika. Slika prikazuje strukturu uočenu i u drugim literaturnim radovima [35, 53].

EDS analizom uzoraka ustanovljeno je da uz železo i ugljenik ima prisustvo hroma, nikla, silicijuma i mangana (tabela 4.4, strana 90). Međusobnim poređenjem kod svih zavarivanih uzoraka hemijski sastav je približno isti i u skladu je sa vrednostima dobijenim u osnovnom materijalu. Na uzorku zavarenom sa aktivnim premazom na bazi 5% TiO₂ detektovan je najveći udeo silicijuma od 0,84% koji je veći nego i u osnovnom materijalu 0,79%, ovo se može pripisati samom osnovnom materijalu, odnosno segregaciji silicijuma u materijalu.

5.2.3 Hemijski sastav

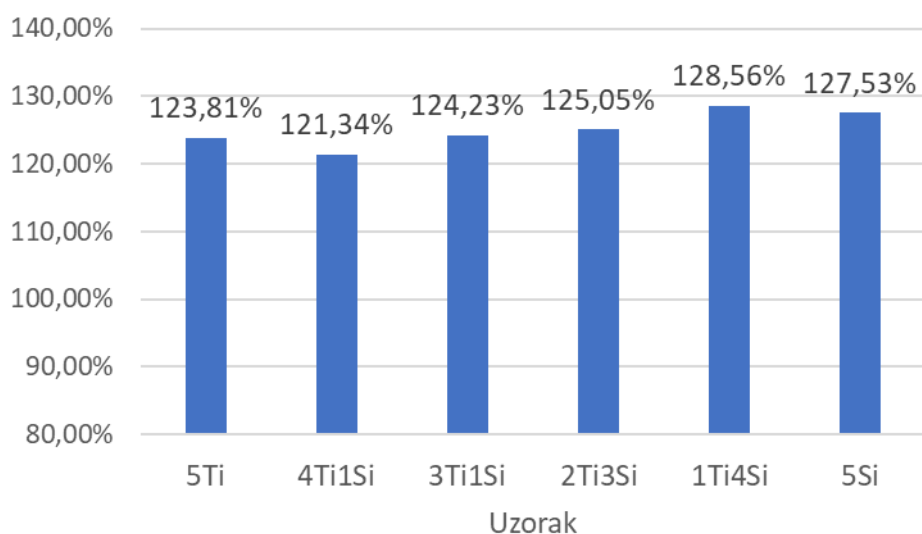
Pored EDS analize izvršeno je ispitivanje metala šava na optičkom spektrometru na kojem je utvrđeno prisustvo više hemijskih elemenata u metalu šava (tabela 4.5, strana 91). Detektovana je količina ugljenika, hroma, nikla, silicijuma, mangana kao i prisustvo neistotopnog sumpora i fosfora. Razlike između rezultata dobijenih EDS metodom i na OES su izražene kod silicijuma gdje je EDS detektovao do dva puta više u odnosu na OES. Sadržaj silicijuma detektovanog EDS metodom u osnovnom materijalu je veći od standardom propisanih 0,75%, tako je kod uzoraka 5Ti, 4Ti1Si i 3Ti2Si, dok postupkom optičke spektrometrije sadržaj silicijuma je u granicama standarda. Preciznija metoda za određivanje sastava je optička emisija spektrometrija i svi detektovani hemijski elementi nalaze se u propisanim granicama određenih standardom ASTM A240/A240M:2004.

5.2.4 Mehanička ispitivanja

5.2.4.1 Ispitivanje zatezanjem

Za osnovni materijal AISI 304L po standardu ASTM A240/A240M:2004 mehaničke osobine su date u tabeli 3.8 (strana 77).

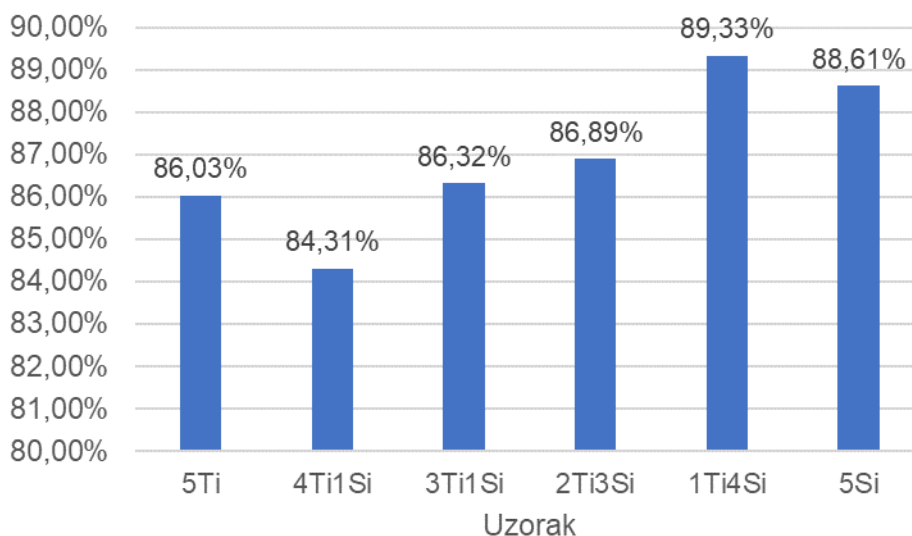
Na osnovu vrednosti iz tabele 4.6 (strana 92) svi zavareni spojevi zadovoljavaju standardnom propisane najmanje vrednosti zatezne vrstene, napona tečenja i izduženja. Na dijagramu prikazanom na slici 5.3 dati su odnosi dobijenih zateznih vrstena i najmanje vrednosti zatezne vrstene propisane standardom. Kod svih uzoraka, zatezna vrstena je u odnosu na standardom propisanu najmanju zateznu vrstenu za elik AISI 304L veća i iznosi između 121,34% i 128,56%.



Slika 5.3 Efikasnost zavarenog spoja u odnosu na standardom propisanu najmanju vrednost zatezne vrstene

Me utim, do loma kod svih uzoraka je došlo u metalu šava, što pokazuje da metal šava ima niže zatezne karakteristike od osnovnog materijala korištenom u ovom eksperimentu. U poređenju sa dobijenim zateznim karakteristikama osnovnog materijala svi zavareni uzorci imaju niže vrednosti zatezne vrstene, napona tečenja, izduženja i suženja. Kod zavarenih uzoraka se ne posmatra napon tečenja, kao ni izduženje preko zavarenog spoja, već samo zatezna vrstena.

Na osnovu odnosa srednje vrednosti zatezne vrstene zavarenih uzoraka i osnovnog materijala napravljen je dijagram efikasnosti zavarenog spoja, koji je prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4 Efikasnost zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal

Dobijeni rezultati pokazuju da svi zavareni spojevi imaju efikasnost veću od 80%. Najveća vrednost od 89,33% je kod uzorka 1Ti4Si, sledeći je uzorak 5Si sa 88,61%, dok najniža vrednost je kod uzorka 4Ti1Si i iznosi 84,31%. Najveća je u radu [26] postigao efikasnost zavarenog spoja sa premazom na bazi TiO_2 od 88%, dok je najveću efikasnost od 97,5% postigao zavarivanjem sa aktivnim premazom na bazi čestica ZrO pri zavarivanju raznorodnih čelika AISI 304L i ASME SA516 debljina 6 mm uz potpuni provar.

Me utim u radu [60] izvršeno je zavarivanje raznorodnih materijala AISI 304H i ASTM P92 debljina 8 mm upotrebom aktivnog premaza na bazi čestica TiO_2 i TIG postupkom u više prolaza sa upotrebom dodatnog materijala Inconel 82. Nakon izvršenih mehaničkih ispitivanja ustanovljeno je da uzorak zavaren aktivnim premazom ima veću zateznu vrstenu od uzorka zavarenog u više prolaza TIG postupkom. Nasuprot ovim rezultatima u radu Dhandha [69] pri uporednom zavarivanju čelika AISI P91 debljine 6 mm TIG postupkom u više prolaza uz upotrebu dodatnog materijala ER90S-B9 (hromni čelik sa niskim sadržajem ugljenika) i A-TIG postupkom sa premazom na bazi čestica MnO_2 rastvorenim u metanolu, u oba slučaja dobio zateznu vrstenu nižu od osnovnog materijala. TIG postupkom je postignuta već zatezna vrstena u odnosu na A-TIG postupak, kod TIG postupka efikasnost spoja je 99%, dok je kod A-TIG postupka 90%.

S obzirom da rezultati u radu Sharpe [60] odstupaju u odnosu na rezultate u radovima [26, 64] i rezultata iz ovog rada, a da je zavarivanje A-TIG postupkom izvršeno bez dodatnog materijala jasno je da livena mikrostruktura, neizbežna kod postupaka zavarivanja topljenjem, ima niže mehaničke osobine u odnosu na valjanu, deformaciono ojačanu mikrostrukturu osnovnog materijala [70]. Postoji velika mogućnost da su dobijeni rezultati posledica odabira dodatnog materijala koji nije optimalan.

Kod uzoraka 1Ti4Si i 5Si prilikom ispitivanja hemijskog sastava detektovana je veća količina ugljenika od 0,03% i 0,025% u odnosu na ostale uzorke gde je detektovano 0,02% ugljenika. To može biti dodatni razlog da ti uzorci imaju u određenoj meri veći u zateznu vrstou, a samim tim i veću efikasnost zavarenog spoja. Određena razlika u hemijskom sastavu je otkrivana i dopuštena u realnom materijalu, te nije kritična ako su mehaničke osobine veće od minimalno garantovanih (zahtevanih) standardom za taj materijal.

Upotrebom statističke metode Anova sa Tukey testom, ustanovljeno je da vrsta aktivnog premaza nema značajnog uticaja na dobijene rezultate mehaničkih karakteristika (tabela 5.1). Na osnovu dobijenih rezultata zateznih karakteristika može se reći da uzorak 1Ti4Si, odnosno uzorak zavaren sa aktivnim premazom sa esticama 1% TiO₂ i 4% SiO₂ ima najbolje mehaničke karakteristike, sledeći je uzorak 3Ti2Si sa aktivnim premazom na bazi mešavine estica 3% TiO₂ i 2% SiO₂ estica. Najniža vrednost mehaničkih osobina je postignuta kod uzorka 4Ti1Si, sa 4% TiO₂ i 1% SiO₂ estica.

Tabela 5.1 Anova Tukey Method 95% pouzdanosti

Uzorak	Broj	Srednja vrednost	Grupa
1Ti4Si	8	222.7	A
3Ti2Si	8	217.8	A
5Si	8	217.4	A
2Ti3Si	8	217.0	A
5Ti	8	216.6	A
4Ti1Si	8	213.1	A

Napomena: Uzorci sa različitim slovima su signifikantno različiti

Makroskopski izgled površine loma ispitanih epruveta zatezanjem (slika 4.22, strana 95) odgovara duktilnom lomu, a daljom analizom površina na SEM-u (slika 4.23, strana 95) to je i potvrđeno. Ovi rezultati su u skladu sa dobijenim vrednostima izduženja i suženja tokom ispitivanja zatezanjem, odnosno sa izmerenom duktilnošću materijala.

5.2.4.2 Ispitivanje savijanjem

Pri ispitivanju savijanjem, nije došlo do pojave ili otvaranja prsline, tako da su svi uzorci zadovoljili standard SRPS EN ISO 5173:2010. To je u skladu sa relativno velikom duktilnoš u materijala metala šava, što se jasno pokazalo pri ispitivanju zatezanjem, gde su kod svih uzoraka dobijene relativno velika izduženja i suženja preseka, tabela 4.6 (strana 92).

5.2.4.3 Ispitivanje energija udara

Za materijal AISI 304L standardom nije propisana minimalna vrednost energije udara, me utim za ekvivalenti elik SRPS EN X2CrNi18-9 jeste, i po standardu SRPS EN 10088-2:2003 iznosi 100 J na sobnoj temperaturi. Svi ispitani uzorci imaju značajno veće u energiju udara. Prosečna vrednost energija potrebna za stvaranje prsline kod zavarenih je 97 J, što je za oko 10 J manje od ispitanih uzoraka osnovnog materijala. Najveća vrednost energije udara zavarenih spojeva je za oko 20 J manja od energije udara osnovnog materijala. Po statističkom proračunu Anova Tukey (tabela 5.2) vrsta ispitanih aktivnih premaza nema značajnog uticaja na vrednost energije udara. Najviše vrednosti su postignute kod uzorka 1Ti4Si potom kod uzorka 3Ti2Si, dok su najniže vrednosti kod uzorka 4Ti1Si.

Tabela 5.2 Anova Tukey Method 95% pouzdanosti

Uzorak	N	Srednja vrednost	Grupa
1Ti4Si	6	174.1	A
3Ti2Si	6	172.9	A
2Ti3Si	6	172.7	A
5Ti	6	172.2	A
5Si	6	167.4	A
4Ti1Si	6	161.4	A

Napomena: Uzorci sa različitim slovima su signifikantno različiti

5.2.4.4 Ispitivanje mikrotvrdoće

Izmerene vrednosti mikrotvrdoće zavarenog spoja su relativno ujednačene kod svih uzoraka i nema značajnih odstupanja od tvrdoće osnovnog materijala. Tseng [55] je u svom radu pokazao da nema značajnog porasta tvrdoće kod uzoraka od AISI 316L zavarenih sa aktivnim premazima na bazi SiO₂ i Al₂O₃.

Kod uzorka 3Ti2Si (slika 4.37, strana 102) postoji značajan skok tvrdoće. Porast tvrdoće je vidljiv i po liniji 3 (slika 4.38, strana 103) kako se merenje približava korenu. Na profilu tvrdoće za liniju 2 vidljivo je da u osnovnom materijalu sa jedne strane metala

šava mikrotvrdo a ve a za oko 30 HV u odnosu na drugu stranu, slika 4.37, što je verovatno razlog za pove anju tvrdo u u metalu šava.

5.2.4.5 Uticaj aktivnog premaza na celokupne mehani ke osobine

Na osnovu celokupnih mehani kih ispitivanja kao najbolji uzorak pokazao se uzorak 1Ti4Si zavaren sa aktivnim premazom na bazi estica 1% TiO₂ i 4% SiO₂ rastvorenim u etanolu. Me utim, dati uzorak je zadovoljio tek nivo kvaliteta D po standardu SRPS EN ISO 5817:2015 zbog dve kratke greške u vidu neprovara, što ukazuje da premaz nema efikasnost na nivou ostalih premaza.

U pogledu mehani kih osobina, nakon uzorka 1Ti4Si nalazi se uzorak 3Ti2Si, zavaren sa aktivnim premazom od 3% TiO₂ i 2% SiO₂. Kod ovog uzorka nakon 8,5 mm od uspostave elektri nog luka dolazi do punog provara koji postoji do kraja zavarivanja. Uzorak poseduje visok odnos D/Š od 1,23.

Razlika izme u ova dva uzorka mogla bi se objasniti rezultatima dobijenim na ure aju zetasizer u uvodnom eksperimentu V u kome su koriš eni isti premazi. U uvodnom eksperimentu V uzorak sa aktivnim premazom 3% TiO₂ i 2% SiO₂ je postigao najve u dubinu uvara, a kao glavni razlog za to je broj detektovanih najsitnijih estica koji iznosi 92,05% od ukupnog broja detektovanih estica. S druge strane, u aktivnom premazu sa mešavinom 1% TiO₂ i 4% SiO₂ detektovano je 89.55% najsitnijih estica od ukupnog broja estica. Na osnovu ovoga, može se re i da kod uzorka 1Ti4Si nije bilo dovoljno sitnih estica koji bi održali koeficijent površinskog napona, ime bi se uticalo na izazivanje Marangonijevog efekta, što uti e na postizanje povoljnog toka te nog metala i pove anje dubine uvara.

6 Zaključci

Na osnovu svih izvedenih eksperimenata i dobijenih rezultata prezentovanih u okviru ove doktorske disertacije, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Minimalna količina estica potrebnih za aktiviranje obrnutog Marangonijevog efekta iznosi 5% kod testiranih estica SiO_2 i TiO_2 . Manja ili veća količina estica u aktivnom premazu (usled manjeg ili većeg udela, ili usled višestrukog nanošenja premaza) uzrokuje slabljenje obrnutog Marangonijevog efekta, a samim tim i smanjene dubine uvara.
- Upotreba acetona kao rastvarača za pravljenje aktivnog premaza rezultira neznatno većom dubinom uvara u odnosu na etanol. Međutim, zbog veće brzine isparavanja acetona sastav aktivnog premaza se menja, odnosno, vremenom se povećava maseni udeo estica, a samim tim dolazi do smanjenja efekta povećanja dubine uvara. Iz tih razloga, zaključeno je da je etanol optimalniji rastvarač za praktičnu primenu.
- Nano estice TiO_2 imaju veći efekat na dubinu uvara u odnosu na submikrosne estice TiO_2 . Međutim, mešavina submikronskih i nano estica se pokazala još efikasnijom na povećanje dubine uvara. Glavni razlog za to je da usled mešanja submikronske estice dolazi do razbijanja aglomerata nano estica i na taj način dobija veći broj sitnijih estica koje imaju veći efekat na povećanje dubine uvara.
- Ispitivanje stvarne veličine estica u aktivnom premazu pomoću odgovarajućeg uređaja (Zetasizer), predstavlja korisnu metodu karakterizacije, jer se može dobiti pozitivna korelacija stvarne veličine estica (ili aglomerata) sa rezultujućom dubinom uvara. Ova metoda do sada nije korišćena u naučnoj literaturi pri ispitivanju uticaja premaza na dubinu uvara zavarivanjem A-TIG postupkom.
- Oštrom konusnom elektrodom prenika 2,4 mm sa uglom vrha 90° i zatupljenjem na vrhu od 0,5 mm postignuti su najbolji rezultati sa aspekta dubine uvara pri upotrebi aktivnih premaza. Međutim, razlika u odnosu na oštru elektrodu bez zatupljenja na vrhu je veoma mala. Kako je sam proces oštrenja elektrode sa zatupljenjem na vrhu komplikovan i teško ponovljiv čak i sa specijalizovanom opremom, može se zaključiti da je oštra elektroda bez zatupljenja na vrhu optimalni izbor za izvođenje A-TIG zavarivanja.

- Elektroda sa tupim vrhom (180°), iako je optimalna sa gledišta jednostavnosti, iskoristivosti i radnog veka elektrode, nije rezultirala adekvatnom dubinom uvara. Osnovni razlog leži u činjenici da je kod takvog tipa elektrode električni luk najuži i zahvata najmanju količinu premaza.
- Elektrodom većeg prenika 3,2 mm najbolji rezultati su postignuti sa oštrom elektrodom sa uglom vrha od 60° , odnosno, sa povećanjem debljine elektrode potrebno je smanjiti ugao vrha elektrode kako bi se postigla najveća iskorišćenost aktivnog premaza.
- Nano estice TiO_2 imaju veći uticaj na dubinu uvara u odnosu na nano estice SiO_2 pri jačini struje od 200 A. Međutim, najveća dubina uvara je postignuta njihovom mešavinom, jer se postiže stvaranje najmanje aglomerata, usled sklonosti mešavina nano estica da slabije aglomerišu, kao i dodatnog usitnjavanja aglomerata prilikom mešanjem estica.
- U ovoj disertaciji je ustanovljeno je da vrsta aktivnog premaza nema značajan uticaj na mikrotvrdoću i energije udara. Rezultati tvrdoće i energija udara pokazali su da zavareni uzorci imaju približne osobine kao i osnovni materijal, uprkos činjenici da metalna šava ima usmerenu dendritsku mikrostrukturu.
- Rezultati zateznih ispitivanja pokazali su da zavareni uzorci A-TIG postupkom imaju nižu zateznu čvrstoću (između 10 i 20 %) od osnovnog materijala, međutim dobijeni rezultati su veći od najmanje vrednosti propisane standardom za austenitni nerđajući čelik AISI 304L, čime je zadovoljen standard ključan za kvalifikaciju zavarenog spoja.
- Na osnovu izgleda metalna šava na zavarenim pločama debljine 10 mm, uočljivo je da za zadate parametre, postoji mogućnost dobijanja provara i na osnovnom materijalu većih debljina. Takođe, za debljinu osnovnog materijala 10 mm korišćenju u ovoj disertaciji postoji mogućnost povećanja brzine zavarivanja i/ili smanjenja jačine struje zavarivanja kod određenih aktivnih premaza koji su pokazali najveću širinu metalna šava u korenu (uzorak 4Ti1Si i 5Ti), uz dalje zadržavanje potpunog provara od 10 mm.
- Tokom procesa TIG zavarivanja sa aktivnim premazom ne nastaje kontaminacija metalna šava esticama iz aktivnog premaza, kao ni volframom usled topljenja elektrode zbog velike energije električnog luka. To ukazuje da aktivni sastojci premaza i elektroda ne menjaju hemijski sastav metalna šava i ne utiču na mehaničke osobine metalna šava. Pored toga, može se zaključiti da je prenik, kao i tip elektrode po sastavu (sadržaj 2% torijum oksida) adekvatan za zadate parametre zavarivanja.

- Upotrebom aktivnog premaza obezbeđuje se povećanje dubine uvara pri A-TIG zavarivanju preko 100%, bez značajnog smanjenja mehaničkih osobina, odnosno, sa zadržavanjem mehaničkih osobina zavarenog spoja koji je na nivou relevantnih standarda. Uštede se postižu u: vremenu potrebnom za pripremu osnovnog materijala, ceni opreme i izrade odgovarajućeg žljeba, vremenu potrebnom za izvođenje više prolaza zavarivanja (kako bi se zavarila ista debljina materijala), ceni utrošenog dodatnog materijala (kako bi se popunio žljeb) i ceni utrošenog zaštitnog gasa za više prolaza. Može se zaključiti, da upotrebom aktivnog premaza bez dodatnog investiranja u opremu, može se postići i poboljšanje produktivnosti uz značajne finansijske uštede.

7 Literatura

- [1] V. Pali , Tehnologija zavarivanja, Novi Sad, 1987.
- [2] A. Sedmak, V. Šilja ki-Žerav i , A. Milosavljevi , V. or evi , M. Vuki evi , Mašinski materijali II, Beograd, 2000.
- [3] A.K. Singh, V. Dey, R.N. Rai, Techniques to improveweld penetration in TIG welding (A review), *Materials Today: Proceedings*. 4 (2017) 1252–1259.
- [4] R.S. Vidyarthi, D.K. Dwivedi, Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, *Journal of Manufacturing Processes*. 22 (2016) 211–228.
- [5] D. Li, S. Lu, D. Li, Y. Li, Principles Giving High Penetration under the Double Shielded TIG Process, *Journal of Materials Science & Technology*. 30 (2014) 172–178.
- [6] A. Berthier, P. Paillard, M. Carin, S. Pellerin, F. Valensi, TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison with simulation Part 2 – arc constriction and arc temperature, *Science and Technology of Welding and Joining*. 17 (2012) 616–621.
- [7] H.Y. Huang, Argon-hydrogen shielding gas mixtures for activating flux-assisted gas tungsten arc welding, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 41 (2010) 2829–2835.
- [8] J. Niagaj, The use of activating fluxes for the welding of high-alloy steels by A-TIG method, *Welding International*. 17 (2003) 257–261.
- [9] J. Niagaj, Use of A-TIG method for welding of titanium, nickel, their alloys and austenitic steels, *Welding International*. 20 (2006) 516–520.
- [10] R.W. Messler, *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*, Wiley-VCH, 2004.
- [11] A.E. Guile, Arc-electrode phenomena, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 118 (1971) 1131.
- [12] Grupa Autora, *Materijal za kurs me unarodnog inženjera za zavarivanje - Zavod zazavarivanje*, 2004.
- [13] P.T. (Peter T. Houldcroft, R. John, *Welding and cutting : a guide to fusion welding and associated cutting processes*, 2001.
- [14] A. O'Brien, *Welding Handbook- Welding Process, part 1*, American Welding Society, 2004.
- [15] Millerwelds, *Handbook: Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, (2002) 84.
- [16] P.W. Muncaster, *Practical TIG (GTA) welding*, 1991.
- [17] P.K. Giridharan, N. Murugan, *Optimization of pulsed GTA welding process*

- parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 40 (2009) 478–489.
- [18] M. Onsoien, R. Peters, D.L. Olson, S. Liu, Arc Effect of Hydrogen in an Argon GTAW Shielding Gas: Characteristics and Bead Morphology Hydrogen content in the shielding gas may have as strong an influence on joint penetration as welding current, 1995.
- [19] J.F. Key, Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW Electrode tip geometry and groove geometry must be compatible to ensure arc stability, 1980.
- [20] Migatronic, TIG welding - Method and Application, n.d.
- [21] M. Ushio, A.A. Sadek, F. Matsuda, Comparison of temperature and work function measurements obtained with different GTA electrodes, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 11 (1991) 81–101.
- [22] T.H. Nobukazu Ikeda, Akihiro Morimoto, Katunori Komehana, Grinding machine for welding electrodes, (2000).
- [23] A.C. Davies, *The Science and Practice of Welding Volume 2.*, Cambridge University Press, 1993.
- [24] L. Liu, Z. Zhang, G. Song, Y. Shen, Effect of Cadmium Chloride Flux in Active Flux TIG Welding of Magnesium Alloys, *The Japan Institute of Metals and Materials*, 2006.
- [25] A. Berthier, P. Paillard, M. Carin, F. Valensi, S. Pellerin, TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: Identification of Marangoni effect, *Science and Technology of Welding and Joining*. 17 (2012) 609–615.
- [26] S.G. Nayee, V.J. Badheka, Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of Dissimilar Activating Flux Assisted-Tungsten Inert Gas Welds, *Journal of Manufacturing Processes*. 16 (2014) 137–143.
- [27] H.-Y. Huang, Research on the activating flux gas tungsten arc welding and plasma arc welding for stainless steel, *Metals and Materials International*. 16 (2010) 819–825.
- [28] K. Devendranath Ramkumar, A. Bajpai, S. Raghuvanshi, A. Singh, A. Chandrasekhar, M. Arivarasu, N. Arivazhagan, Investigations on structure–property relationships of activated flux TIG weldments of super-duplex/austenitic stainless steels, *Materials Science and Engineering: A*. 638 (2015) 60–68.
- [29] S. Lu, H. Fujii, H. Sugiyama, M. Tanaka, K. Nogi, Effects of Oxygen Additions to Argon Shielding Gas on GTA Weld Shape, *ISIJ International*. 43 (2008) 1590–1595.
- [30] K.C. Mills, B.J. Keene, Factors affecting variable weld penetration, *International Materials Reviews*. 35 (1990) 185–216.
- [31] K.C. Mills, B.J. Keene, R.F. Brooks, A. Shirali, Marangoni effects in welding, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 356 (1998) 911–925.

- [32] M. Tanaka, T. Shimizu, T. Terasaki, M. Ushio, F. Koshi-ishi, Y. C.-L., Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*. 5 (2000) 397–402.
- [33] S. Ross, P. Becher, The history of the spreading coefficient, *Journal of Colloid and Interface Science*. 149 (1992) 575–579.
- [34] B.J. Keene, Review of data for the surface tension of pure metals, *International Materials Reviews*. 38 (1993) 157–192.
- [35] P.J. Modenesi, E.R. Apolinário, I.M. Pereira, TIG welding with single-component fluxes, *Journal of Materials Processing Technology*. 99 (2000) 260–265.
- [36] K.-H. Tseng, K.-L. Chen, Comparisons Between TiO₂ - and SiO₂ -Flux Assisted TIG Welding Processes, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 12 (2012) 6359–6367.
- [37] W. Dong, S. Lu, D. Li, Y. Li, GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54 (2011) 1420–1431.
- [38] E.A. Skvortsov, Role of electronegative elements in contraction of the arc discharge, *Welding International*. 12 (1998) 471–475.
- [39] M. Goodarzi, R. Choo, T. Takasu, J.M. Toguri, The effect of the cathode tip angle on the gas tungsten arc welding arc and weld pool: II. The mathematical model for the weld pool, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 31 (1998) 569–583.
- [40] P. Burgardt, C.R. Heiple, Interaction between Impurities and Welding Variable in Determining GTA Weld Shape, *Weld J*. 65 (1986) 150–155.
- [41] G. Venkatesan, V. Muthupandi, J. Justine, Activated TIG welding of AISI 304L using mono- and tri-component fluxes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 93 (2017) 329–336.
- [42] K.-H. Tseng, Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels, *Powder Technology*. 233 (2013) 72–79.
- [43] V. Maduraimuthu, M. Vasudevan, V. Muthupandi, A.K. Bhaduri, T. Jayakumar, Effect of Activated Flux on the Microstructure, Mechanical Properties, and Residual Stresses of Modified 9Cr-1Mo Steel Weld Joints, *Metallurgical and Materials Transactions B*. 43 (2012) 123–132.
- [44] M. Tanaka, Effects of surface active elements on weld pool formation using TIG arcs, *Welding International*. 19 (2005) 870–876.
- [45] T. Sándor, C. Mekler, J. Dobránszky, G. Kaptay, An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow, *Metallurgical and Materials Transactions A*. 44 (2013) 351–361.
- [46] Z. Zhang, L. Liu, H. Sun, L. Wang, AC TIG welding with single-component oxide activating flux for AZ31B magnesium alloys, *Journal of Materials Science*. 43 (2008) 1382–1388.
- [47] C.S. Wu, J.Q. Gao, Analysis of the heat flux distribution at the anode of a TIG welding arc, *Computational Materials Science*. 24 (2002) 323–327.

- [48] M. Goodarzi, R. Choo, J.M. Toguri, The effect of the cathode tip angle on the GTAW arc and weld pool: I. Mathematical model of the arc, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 30 (1997) 2744–2756.
- [49] M. Tanaka, H. Terasaki, H. Fujii, M. Ushio, R. Narita, K. Kobayashi, Anode heat transfer in TIG welding and its effect on the cross-sectional area of weld penetration, *Welding International*. 20 (2006) 268–274.
- [50] A.R. Loureiro, B.F.O. Costa, A.C. Batista, A. Rodrigues, Effect of activating flux and shielding gas on microstructure of TIG welds in austenitic stainless steel, *Science and Technology of Welding and Joining*. 14 (2009) 315–320.
- [51] H.-Y. Huang, Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments, *Materials & Design*. 30 (2009) 2404–2409.
- [52] S. Tathgir, A. Bhattacharya, Activated-TIG Welding of Different Steels: Influence of Various Flux and Shielding Gas, *Materials and Manufacturing Processes*. 31 (2016) 335–342.
- [53] K.-H. Tseng, C.-Y. Hsu, Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011) 503–512.
- [54] T.-S. Chern, K.-H. Tseng, H.-L. Tsai, Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds, *Materials & Design*. 32 (2011) 255–263.
- [55] K.-H. Tseng, P.-Y. Lin, UNS S31603 Stainless Steel Tungsten Inert Gas Welds Made with Microparticle and Nanoparticle Oxides, *Materials*. 7 (2014) 4755–4772.
- [56] A. Hdhibi, K. Touileb, R. Djoudjou, A. Ouis, M.L. Bouazizi, J. Chakhari, Effect of Single Oxide Fluxes on Morphology and Mechanical Properties of ATIG on 316 L Austenitic Stainless Steel Welds, *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 8 (2018) 3064–3072.
- [57] V. Muthukumar, A. Bhaduri Kumar, R. Baldev, Penetration enhancing flux formulation for tungsten inert gas (TIG) welding of austenitic stainless steel and its application, (2012).
- [58] K.-H. Tseng, N.-S. Wang, Research on bead width and penetration depth of multicomponent flux-aided arc welding of grade 316 L stainless steel, *Powder Technology*. 311 (2017) 514–521.
- [59] P.J. Modenesi, P. Colen Neto, E. Roberto Apolinário, K. Batista Dias, Effect of flux density and the presence of additives in ATIG welding of austenitic stainless steel, *Welding International*. 29 (2015) 425–432.
- [60] P. Sharma, D.K. Dwivedi, Comparative study of activated flux-GTAW and multipass-GTAW dissimilar P92 steel-304H ASS joints, *Materials and Manufacturing Processes*. (2019) 1–10.
- [61] H. Fujii, T. Sato, S. Lu, K. Nogi, Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection, *Materials Science and Engineering: A*. 495 (2008) 296–303.

- [62] D. Wei, R. Dave, R. Pfeffer, Mixing and Characterization of Nanosized Powders: An Assessment of Different Techniques, *Journal of Nanoparticle Research*. 4 (2002) 21–41.
- [63] S. Balos, B. Pilic, D. Markovic, J. Pavlicevic, O. Luzanin, Poly(methyl-methacrylate) nanocomposites with low silica addition, *Journal of Prosthetic Dentistry*. 111 (2014) 327–334.
- [64] S. Balos, B. Pilic, D. Petrovic, B. Petronijevic, I. Sarcev, Flexural strength and modulus of autopolymerized poly (methyl methacrylate) with nanosilica, *Vojnosanitetski Pregled*. 75 (2018) 564–569.
- [65] N.W. Elshereksi, S.H. Mohamed, A. Arifin, Z.A.M. Ishak, Effect of Filler Incorporation on the Fracture Toughness Properties of Denture Base Poly(Methyl Methacrylate), 2009.
- [66] <http://www.ddbst.com/>, (2019).
- [67] G. Venkatesan, J. George, M. Sowmyasri, V. Muthupandi, Effect of Ternary Fluxes on Depth of Penetration in A-TIG Welding of AISI 409 Ferritic Stainless Steel, *Procedia Materials Science*. 5 (2014) 2402–2410.
- [68] A. Efimov, A. Lizunova, V. Sukharev, V. Ivanov, Synthesis and Characterization of TiO₂, Cu₂O and Al₂O₃ Aerosol Nanoparticles Produced by the Multi-Spark Discharge Generator, *Korean Journal of Materials Research*. 26 (2016) 123–129.
- [69] K.H. Dhandha, V.J. Badheka, Comparison of Mechanical and Metallurgical Properties of Modified 9Cr–1Mo Steel for Conventional TIG and A-TIG Welds, *Transactions of the Indian Institute of Metals*. (2019) 1–13.
- [70] S. Balos, Nehomogeni dodatni razmaknuti metalni oklop za oklopna vozila (disertacija), Fakultet tehni kih nauka, 2010.