

Optimizacija parametara pri rezanju plazmom

Mioč, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:399276>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**

Repository / Repozitorij:

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



FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU



**OPTIMIZACIJA PARAMETARA PRI
REZANJU PLAZMOM**

DIPLOMSKI RAD

Josip Mioč

ZAGREB, 2011.

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU



**OPTIMIZACIJA PARAMETARA PRI
REZANJU PLAZMOM**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Josip Mioč

ZAGREB, 2011.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, koristeći se znanjem stečenim na fakultetu, kao i navedenom literaturom.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen pod stručnim vodstvom prof. dr. sc. Zorana Kožuha. Ovim putem mu se zahvaljujem na pruženoj podršci i korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Ivici Garašiću i mag. ing. mech. Jozefu Tuniću na vođenju tijekom izrade diplomskog rada te na korisnim savjetima i pomoći, kako pri izradi teoretskog dijela, tako i pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Sanjinu Mahoviću, tehničkom suradniku Tomislavu Habeku te dr. sc. Ivanu Stojanoviću na ukazanoj suradnji i pomoći pri izradi ovog rada.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima i bratu, na velikoj potpori i strpljenju tijekom cijelog mog školovanja, a posebno tijekom fakultetskog obrazovanja.

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je optimizacija parametara pri rezanju plazmom određenih vrsta materijala. U uvodnom dijelu opisan je postupak plazma rezanja, njegove inačice te prednosti i nedostaci pojedinih postupaka rezanja. Opisana je i pripadajuća oprema za plazma rezanje te utjecaj parametara na kvalitetu plazma rezanja. Isto tako, u uvodu je objašnjena i norma HRN EN ISO 9013 prema kojoj se određuje kvaliteta reza.

Eksperimentalni dio izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Pomoću plazma uređaja SPARCIN 900M rezane su različite vrste materijala, nelegirani čelik i nehrđajući čelik debljine 5 mm te aluminijska legura debljine 4 mm. Uzorci su rezani s različitim brzinama u vidu optimizacije brzine rezanja s obzirom na kvalitetu reza. Raspon brzina je iznosio od 1 m/min do 5 m/min s korakom od 0,5 m/min. Promatran je utjecaj plazmenog plina na kvalitetu površine reza i brzinu rezanja. Nakon rezanja, u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) izvršena su mjerenja pojedinih značajki kvalitete reza te svrstavanje u pojedine klase kvalitete rezanja. Na uređaju za mjerenje hrapavosti površina, perthometer S8P, mjerene su različite veličine hrapavosti površine dok je tolerancija okomitosti ili kutnosti mjerena uz pomoć kutomjera. Veličine hrapavosti Rz – prosječne visine neravnina te vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013 te je prikazan utjecaj plazmenog plina na kvalitetu reza i brzinu rezanja svih upotrijebljenih osnovnih materijala.

Dobivene su različite klase kvalitete reza te su utvrđene optimalne brzine rezanja za pojedine plazmene plinove i kombinacije osnovnih materijala. Promjena plazmenog plina pokazala se kao utjecajni čimbenik na kvalitetu reza i brzinu rezanja. Optimalna brzina rezanja nelegiranog čelika debljine 5 mm s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 2 m/min kojom se postiže prva klasa hrapavosti površine te četvrta klasa tolerancije okomitosti ili kutnosti. Rezanjem nelegiranog čelika iste debljine s kisikom kao plazmenim plinom s optimalnom brzinom rezanja od 1,5 m/min postiže se prva klasa hrapavosti površine i treća klasa tolerancije okomitosti ili kutnosti. Optimalna brzina rezanja nehrđajućeg čelika debljine 5 mm s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 2 m/min kojom se postiže druga klasa hrapavosti te četvrta klasa tolerancije okomitosti ili kutnosti, dok rezanje s dušikom kao plazmenim plinom nije dalo uspješne rezultate. Optimalna brzina rezanja aluminijske legure debljine 4 mm iznosi 5 m/min, s zrakom kao plazmenim plinom te 4 m/min s Ar/H₂ mješavinom plinova.

Rezanjem aluminijske legure zrakom kao plazmenim plinom se postiže treća klasa hrapavosti površine kao i tolerancije okomitosti ili kutnosti, dok se s Ar/H₂ mješavinom postiže druga klasa hrapavosti površine te četvrta klasa tolerancije okomitosti ili kutnosti.

Sadržaj:

Popis slika.....	I
Popis tablica	VI
1. Uvod	1
2. Teorijski dio	2
2.1. Plazma rezanje.....	2
2.2. Postupci rezanja plazmom.....	3
2.2.1. Plazma rezanje bez sekundarnog medija.....	4
2.2.2. Plazma rezanje sa sekundarnim medijem.....	5
2.2.2.1. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom	5
2.2.2.2. Plazma rezanje s injektiranom vodom	7
2.2.2.3. Plazma rezanje pod zaštitom vode	8
2.2.3. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka	9
2.3. Sustav za plazma rezanje.....	11
2.3.1. Izvor za plazma rezanje.....	12
2.3.2. Pištolj za plazma rezanje	14
2.3.2.1. Regulacija visine pištolja za plazma rezanje od radnog komada.....	16
2.3.3. Sustav za vođenje	18
2.4. Utjecaj parametara na kvalitetu plazma rezanja.....	20
2.5. Tehnički plinovi pri plazma rezanju.....	25
2.6. Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (HRN EN ISO 9013:2003).....	28
2.6.1. Područje primjene	28

2.6.2. Veličine i definicije objašnjene slikama.....	28
2.6.2.1. Tolerancija okomitosti ili kutnosti	30
2.6.2.2. Prosječna visina neravnina	30
2.6.3. Određivanje kvalitete površine reza.....	31
2.6.3.1. Uvjeti za mjerenje	32
2.6.3.2. Točka mjerenja.....	32
2.6.3.3. Položaj točaka mjerenja	32
2.6.4. Kvaliteta površine reza.....	34
2.6.4.1. Rasponi mjerenja.....	34
3. Eksperimentalni dio.....	37
3.1. Oprema za rezanje	37
3.2. Radni materijali	40
3.3. Plan pokusa	44
3.4. Plazma rezanje nelegiranog čelika S235JRG1	46
3.4.1. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak	46
3.4.2. Mjerenje hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak	48
3.4.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak	54
3.4.4. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik.....	56
3.4.5. Mjerenje hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik	58
3.4.6. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik	62
3.4.7. Usporedba kvalitete rezanja nelegiranog čelika.....	63

3.5. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2	65
3.5.1. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	65
3.5.2. Mjerenje hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	68
3.5.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	73
3.5.4. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik.....	75
3.5.5. Usporedba kvalitete rezanja nehrđajućeg čelika	76
3.6. Plazma rezanje Al legure AlMg3	77
3.6.1. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin zrak.....	77
3.6.2. Mjerenje hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak.....	79
3.6.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza Al legure – plazmeni plin zrak..	84
3.6.4. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	85
3.6.5. Mjerenje hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	87
3.6.6. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	91
3.6.7. Usporedba kvalitete rezanja Al legure	93
4. Zaključak	95
5. Literatura	97

Popis slika

Slika 2.1. Preneseni i nepreneseni luk plazma rezanja [2]	3
Slika 2.2. Standardni postupak plazma rezanja [2]	4
Slika 2.3. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom [2]	5
Slika 2.4. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom u vodi [2]	6
Slika 2.5. Plazma rezanje s injektiranom vodom [2].....	7
Slika 2.6. Plazma rezanje pod zaštitom vode [2]	8
Slika 2.7. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka – precizno plazma rezanje [2]	9
Slika 2.8. Sustav strojnog plazma rezanja [2]	11
Slika 2.9. Algoritam mikroprocesorskog kontrolera [8]	13
Slika 2.10. Oštećenje unutarnjeg dijela sapnice [11]	15
Slika 2.11. Oštećenje vanjskog dijela sapnice [11]	15
Slika 2.12. Tijek gibanja pištolja kod CNC upravljanog rezanja plazmom [9]	17
Slika 2.13. Kontrolni CNC sustav za plazma rezanje VANAD MEFI (FSB – Laboratorij za zavarivanje) [9]	19
Slika 2.14. Izgled reza kod plazma rezanja [14]	20
Slika 2.15. Brzina rezanja u ovisnosti o debljini materijala [16]	24
Slika 2.16. Utjecaj stanja potrošenosti sapnice na stanje rezne površine i pojavu srha s naličja reza [13].....	24
Slika 2.17. Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim veličinama [20].....	29
Slika 2.18. Gotovi radni komad s odgovarajućim veličinama [20].....	29
Slika 2.19. Tolerancija okomitosti ili kutnosti [20]	30

Slika 2.20. Prosječna visina neravnina [20]	30
Slika 2.21. Definicija raspona mjerenja za tolerancije okomitosti ili kutnosti [20].....	33
Slika 2.22. Tolerancija okomitosti ili kutnosti, u – debljine radnog komada do 30 mm [20]..	36
Slika 2.23. Prosječna visina neravnina, Rz5 – debljine radnog komada do 30 mm [20].....	36
Slika 3.1. Prikaz CNC stola i upravljačke jedinice za plazma rezanje.....	37
Slika 3.2. Prikaz odsisnog sustava i izvora za plazma rezanje.....	39
Slika 3.3. Skica rezanja	45
Slika 3.4. Uzorci nelegiranog čelika nakon rezanja – plazmeni plin zrak	46
Slika 3.5. Prikaz uređaja za ispitivanje hrapavosti površine	49
Slika 3.6. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	51
Slika 3.7. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	52
Slika 3.8. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	52
Slika 3.9. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	53
Slika 3.10. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	53
Slika 3.11. Kutomjer korišten za mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti.....	54
Slika 3.12. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	55
Slika 3.13. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik	56

Slika 3.14. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	59
Slika 3.15. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	60
Slika 3.16. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	60
Slika 3.17. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	61
Slika 3.18. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	61
Slika 3.19. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	63
Slika 3.20. Uzorci nehrđajućeg čelika nakon rezanja – plazmeni plin zrak.....	65
Slika 3.21. Odrezivanje uzoraka nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	66
Slika 3.22. Uzorci kod kojih nije postignuto rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak	67
Slika 3.23. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	71
Slika 3.24. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	71
Slika 3.25. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	72
Slika 3.26. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	72
Slika 3.27. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	73

Slika 3.28. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	74
Slika 3.29. Gornja (lijevo) i donja (desno) strana uzoraka nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik	75
Slika 3.30. Uzorci Al legure – plazmeni plin zrak	77
Slika 3.31. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak	81
Slika 3.32. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak.....	82
Slika 3.33. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak.....	82
Slika 3.34. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak	83
Slika 3.35. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak.....	83
Slika 3.36. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak	84
Slika 3.37. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	85
Slika 3.38. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	89
Slika 3.39. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	89
Slika 3.40. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	90
Slika 3.41. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	90

Slika 3.42. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	91
Slika 3.43. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	92

Popis tablica

Tablica 2.1. Nepravilnosti kod plazma rezanja [15]	22
Tablica 2.2. Kombinacije plinova kod rezanja plazmom [6, 13]	27
Tablica 2.3. Precizni mjerni instrumenti [20].....	31
Tablica 2.4. Hrapavi mjerni instrumenti [20].....	31
Tablica 2.5. Dimenzije Δa [20]	33
Tablica 2.6. Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u [20].....	35
Tablica 2.7. Rasponi prosječnih visina neravnina, $Rz5$ [20].....	35
Tablica 3.1. Tehnički podaci izvora za plazma rezanje SPARCIN 900M [20]	39
Tablica 3.2. Kemijski sastav čelika S235JRG1 [23].....	40
Tablica 3.3. Mehanička svojstva čelika S235JRG1 [22]	40
Tablica 3.4. Kemijski sastav čelika X5CrNiMo17-12-2 [23]	42
Tablica 3.5. Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2 [23].....	42
Tablica 3.6. Osnovna svojstva lijevanih Al-Mg legura [22]	43
Tablica 3.7. Kemijski sastav Al – legure AlMg3 [25]	43
Tablica 3.8. Mehanička svojstva Al – legure AlMg3 [25].....	43
Tablica 3.9. Plan pokusa	44
Tablica 3.10. Parametri rezanja nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak.....	47
Tablica 3.11. Izgled površina reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak	48
Tablica 3.12. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak.....	50
Tablica 3.13. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak	54

Tablica 3.14. Parametri rezanja nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik.....	57
Tablica 3.15. Izgled površina reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik	57
Tablica 3.16. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik.....	58
Tablica 3.17. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik	62
Tablica 3.18. Usporedba kvalitete rezanja nelegiranog čelika.....	64
Tablica 3.19. Parametri rezanja nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	66
Tablica 3.20. Izgled površina reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	68
Tablica 3.21. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak.....	69
Tablica 3.21. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak – nastavak.....	70
Tablica 3.22. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak	74
Tablica 3.23. Parametri rezanja nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik	76
Tablica 3.24. Značajke kvalitete optimalnog reza nehrđajućeg čelika.....	77
Tablica 3.25. Parametri rezanja Al legure – plazmeni plin zrak	78
Tablica 3.26. Izgled površina reza Al legure – plazmeni plin zrak.....	79
Tablica 3.27. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak.. ..	80
Tablica 3.27. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak – nastavak.....	81
Tablica 3.28. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – Al legura – plazmeni plin zrak	84

Tablica 3.29. Parametri rezanja Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	85
Tablica 3.30. Izgled površina reza Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	86
Tablica 3.31. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂	87
Tablica 3.31. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H ₂ – nastavak.....	88
Tablica 3.32. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – Al legura – plazmeni plin Ar/H ₂	91
Tablica 3.33. Usporedba kvalitete rezanja Al legure	93

1. Uvod

U metalnoj industriji postupak rezanja primarni je proces u tehnološkom slijedu operacija izrade neke konstrukcije zbog čega je potrebno pažljivo odabrati tehnologiju rada i osigurati da se proizvodnja odvija bez prekida i u predviđenom vremenskom roku. Također, tehnologija rezanja treba biti takva da proizvod nakon rezanja bude spreman za slijedeću tehnološku operaciju (npr. zavarivanje), odnosno bez potrebe naknadne obrade reza (čist rez, sa što manje deformacija), što u protivnom iziskuje dodatne troškove i povisuje cijenu proizvodnje. Zato je odabir odgovarajućeg postupka rezanja od odlučujuće važnosti za upravljanje troškovima. Sve veća internacionalizacija tržišta i pojačani pritisak konkurencije zahtijevaju porast ekonomičnosti proizvodnje u pogonima i postizanje više razine kvalitete. Tehnologija rezanja bez naknadne obrade reza snižava troškove – to je jedan od ciljeva na putu k povećanju konkurentnosti poduzeća. Kod izbora postupka rezanja važno je uzeti u obzir sve čimbenike koji utječu na troškove rezanja kako bi se dobila stvarna cijena postupka rezanja izražena po satu rezanja odnosno po metru reza. Često se nakon analize može doći i do takvih rezultata kod kojih je postupak rezanja koji je jeftiniji po metru reza u konačnici skuplji uzimajući u obzir i troškove naknadnih operacija.

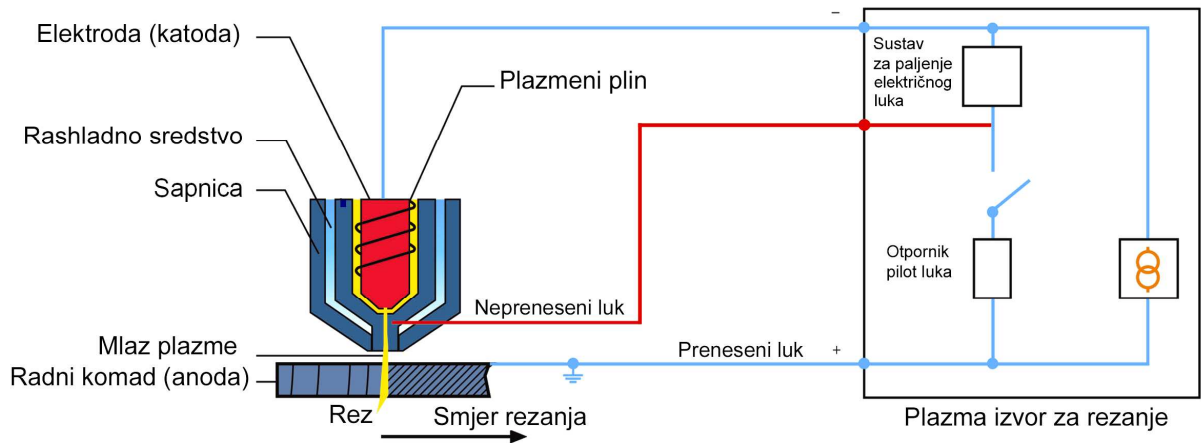
2. Teorijski dio

2.1. Plazma rezanje

Plazma rezanje je razvijeno 1950 – tih za rezanje metala koji nisu mogli biti rezani plinskim plamenom, kao što su nehrđajući čelik, aluminij i bakar. Rezanje metala postoji još od vremena otkrića postupaka zavarivanja. Ciljevi koji su postavljani tokom razvijanja plazma rezanja su praktično isti kao i u današnjoj metalnoj industriji. Poboljšanja se odnose na povećanje brzine rezanja, bolju kvalitetu reza, postizanje dužeg vijeka trajanja potrošnih materijala i slično. Veliki broj inovacija i poboljšanja vezan je uz prvih 15 – ak godina razvoja plazma rezanja. Ove inovacije se prvenstveno odnose na povećanje gustoće i stabilnosti električnog luka, razvijanje raznih plazmenih mješavina, poboljšanje sustava hlađenja te mogućnosti upotrebe rezanja za razne materijale.

Kasniji razvoj uključio je rezanje ugljičnog i niskolegiranog čelika te razvoj visokopreciznih jedinica za plazma rezanje. U novije vrijeme plazma rezanje koristi sve prednosti automatizacije, mogućnosti integracije s izvorom energije i CNC sustave što rezultira s mogućnošću postizanja velikih brzina rezanja i jako dobre kvalitete rezanja. Pojava i korištenje CNC sustava upravljanja značajno je promijenila proizvodnju, odnosno znatno se smanjio broj koraka koji je zahtijevao prisustvo čovjeka. CNC sustavi su donijeli povećanje automatizacije proizvodnje, postignuta su poboljšanja u kvaliteti reza te je znatno smanjen broj pogrešaka.

Plazma je stanje tvari u kojoj su plinovi ionizirani. Slična je fluidu i često je nazivaju četvrtim agregatnim stanjem. Rezanje plazmom je postupak rezanja koji se zasniva isključivo na energiji dovedenoj izvana, to jest energijom termičke plazme koja tali radni komad, a nastalu talinu izbacuje mlaz plinova koji se koriste za stvaranje plazme. Plazmeni mlaz dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na – pol izvora struje i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice pištolja uređaja (nepreneseni luk). *Slika 2.1.* prikazuje preneseni i nepreneseni luk plazma rezanja. Nepreneseni luk je podesan za rezanje predmeta koji nisu električki vodljivi (npr. polimera) te za paljenje električnog luka (pilot luk). Za sve druge materijale primjenjuje se preneseni luk kod kojeg se ostvaruje puno veći unos toplinske energije u radni komad koji je u ovom slučaju dio strujnog kruga [1 – 5].



Slika 2.1. Preneseni i nepreneseni luk plazma rezanja [2]

Električni luk održava se u cilindričnom kanalu hlađenim vodom. U kanal se pod tlakom dovodi plin (Ar, H₂, N₂, njihove mješavine te zrak ili kisik) koji se prolaskom električnim lukom disocira i ionizira zbog toplinske energije električnog luka. Na taj način dobiva se mlaz plazme visoke temperature (20 000 – 40 000°C) i visoke gustoće snage koji može taljenjem rezati sve metale [2]. Nakon izlaska mlaza plazme iz sapnice dolazi do prenošenja energije preuzete iz električnog luka na rezni komad i plin se vraća u stabilno stanje. Postupak rezanja plazmom može biti ručni i strojni. Brzina rezanja plazmom može biti i do 2 m/min, a ovisi o vrsti materijala koji se reže, debljini materijala i struji električnog luka.

2.2. Postupci rezanja plazmom

Danas su na raspolaganju slijedeće varijante postupka:

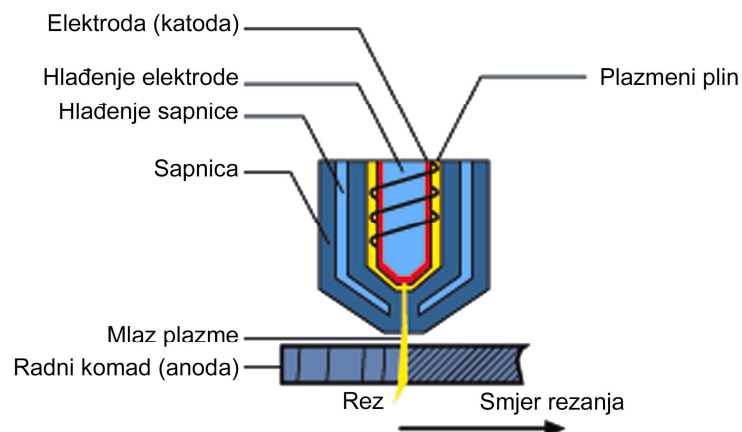
- rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma),
- rezanje plazmom sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima ili u vodi,
- rezanje plazmom sa suženim plazmenim lukom [6].

2.2.1. Plazma rezanje bez sekundarnog medija

Rezanje plazmom bez sekundarnog medija, standardna plazma, koristi se kod:

- ručnog rezanja plazmom i žlijebljenja,
- manjeg broja dijelova koji se režu, odnosno manje debljine limova,
- ne previsokih zahtjeva na kvalitetu reza.

Slika 2.2. prikazuje standardni postupak plazma rezanja. Za ovu inačicu plazma rezanja postoje mnogobrojni slučajevi primjene s CNC upravljanim sustavima za vođenje plazma pištolja, npr. kod proizvodnje panela u brodogradnji, gdje je rezanje plazmom neposredna priprema za zavarivanje, kod završne obrade i pakiranja limova u čeličanama te kod robotiziranog rezanja cijevi, I – profila i plosnatih profila s izbočinama. Kod plazma rezanja bez sekundarnog medija koristi se samo jedan plin (zrak, dušik ili kisik) koji ujedno hladi i razvija luk plazme. Uglavnom se ovaj postupak koristi kod ručnih postupaka rezanja, za materijale tanje od 16 mm i struje do 100 A [2, 6].



Slika 2.2. Standardni postupak plazma rezanja [2]

2.2.2. Plazma rezanje sa sekundarnim medijem

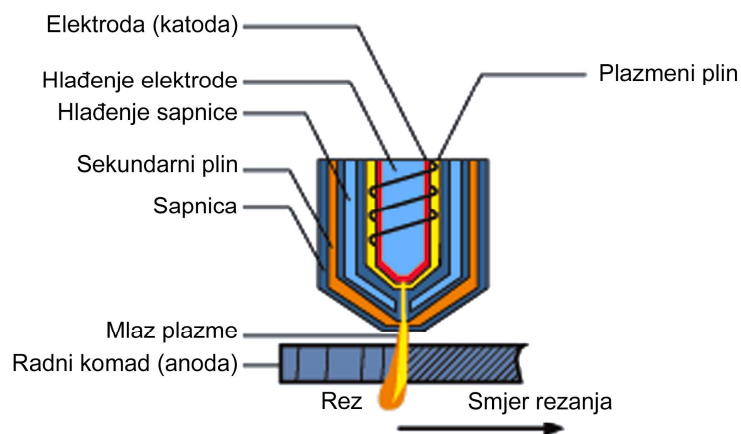
Upotreba plazma pištolja sa sekundarnim medijem, ima prednost kod:

- proizvodnje manjih dijelova,
- čestog bušenja, odnosno započinjanja rezanja,
- potrebne visoke kvalitete reza, posebno kod Cr-Ni čelika i kod aluminija,
- rezanja rešetaka, odnosno rezova s prekidima,
- podvodnog rezanja plazmom [6].

2.2.2.1. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom

Koaksijalno sa sapnicom plazma pištolja nalazi se sapnica za dovod rotirajućeg plina, koji „omata“, odnosno štiti plazmeni plin od utjecaja okolne atmosfere. Rotirajući plin i sapnica rotirajućeg plina koja je bez potencijala, štite sapnicu od štrcanja rastaljenog metala, koje se događa prilikom bušenja lima. Kod određenih debljina lima bušenje se izvodi dok pištolj stoji, pa je tako moguće rezanje malih kontura bez početnog, odnosno ulaznog reza [6].

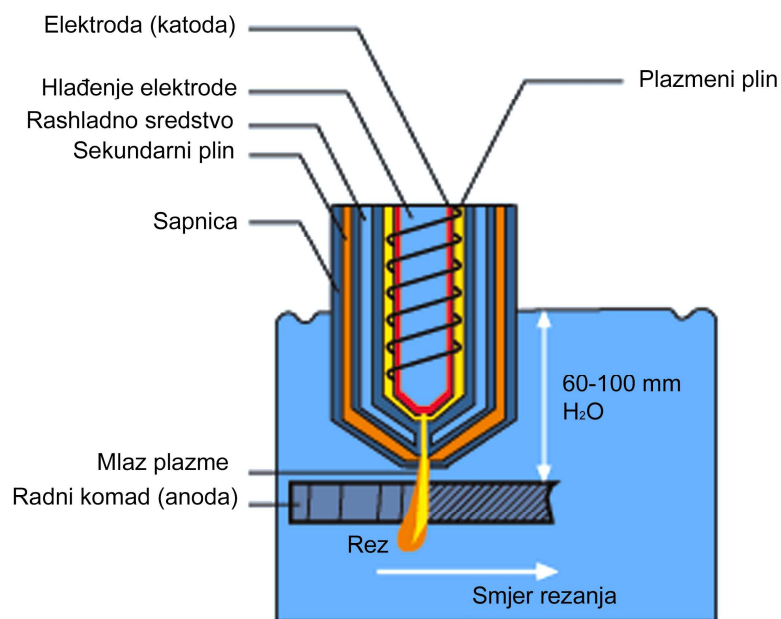
Slika 2.3. prikazuje plazma rezanje sa sekundarnim plinom.



Slika 2.3. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom [2]

Rotirajući plin sprječava sudjelovanje okolnog zraka u reakciji plazmenog mlaza i rastaljenog metala u zoni reza. To je posebno važno kod rezanja visokolegiranih čelika, gdje inače dolazi do reakcije kisika sadržanog u zraku s površinom reza, koji izaziva njenu oksidaciju i u većini slučajeva naknadnu obradu skidanja nastalih oksida. Upotreba dušika kao rotirajućeg plina je nužna za rezanje bez srha kod limova od visokolegiranih čelika debljine do 20 mm [6].

Zbog zaštitnog djelovanja rotirajućeg plina, takvi plazma pištolji mogu se rabiti i za podvodno rezanje plazmom. *Slika 2.4.* prikazuje plazma rezanje sa sekundarnim plinom u vodi. Nasuprot suhom rezanju plazmom, kod podvodnog rezanja je značajno reducirana buka te pojava prašine i aerosola, a ultraljubičasto zračenje luka se dodatno filtrira u vodi. Deformacija radnih komada također je vrlo mala, ali je potrošnja energije veća u odnosu na suho rezanje plazmom. Maksimalna debljina lima koja se može rezati suhim rezanjem plazmom iznosi 180 mm pri jačini struje od 600 A, a kod podvodnog rezanja iznosi 100 mm pri 750 A struje rezanja [6].



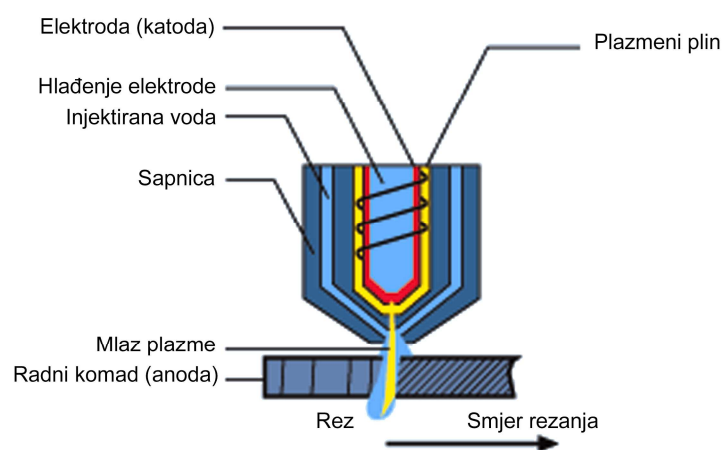
Slika 2.4. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom u vodi [2]

Kod plazma rezanja pod vodom radni komad je uronjen 60 – 100 mm u vodu. Isto tako sapnica je za vrijeme rezanja pod vodom. Na taj način su uvelike smanjeni štetni utjecaji postupka rezanja plazmom na okoliš, a i smanjen je utjecaj razvijene topline na kvalitetu reza.

S druge strane, nedostatak rezanja plazmom pod vodom je da radni komad nije vidljiv za vrijeme rezanja i ne može se vidjeti da li se ostvaruje kvalitetan i traženi rez, brzine rezanja su smanjene za 10 – 20%, a i smanjena je mogućnost rezanja većih debljina radnog komada [2]. Rezanje se izvodi u kadama, odnosno stolovima koji imaju mogućnost naplovljavanja vodom koje je potrebno periodički čistiti što rezultira zaustavljanjem proizvodnje na nekoliko sati, također i dodatnim troškovima održavanja, a to je još jedan nedostatak primjene plazma rezanja pod vodom. Kako bi se izbjegli dodatni troškovi čišćenja stolova i zaustavljanja proizvodnje, danas su razvijeni vodeni stolovi koji imaju mogućnost samočišćenja što predstavlja praktično i ekonomično rješenje za korisnike.

2.2.2.2. Plazma rezanje s injektiranom vodom

Slika 2.5. prikazuje plazma rezanje s injektiranom vodom. Ovaj postupak rezanja koristi samo jedan plin za plazmu, a vodu ubrizgava radijalno ili vrtložno direktno u luk čime se postiže sužavanje luka i povećanje gustoće plazmenog luka. Razlog za sužavanje električnog luka bilo je stvaranje izolatorskog graničnog parnog sloja između plazmenog mlaza i injektirane vode. Zaštitna svojstva parnog sloja omogućila su otkrićem ovog postupka (1968.god.), uvođenje jedinstvene inovacije: cijeli donji dio sapnice je mogao biti izrađen od keramike. Kao posljedica toga, pojava stvaranja dvostrukog električnog luka, najvećeg uzročnika uništenja sapnice, je eliminirana.

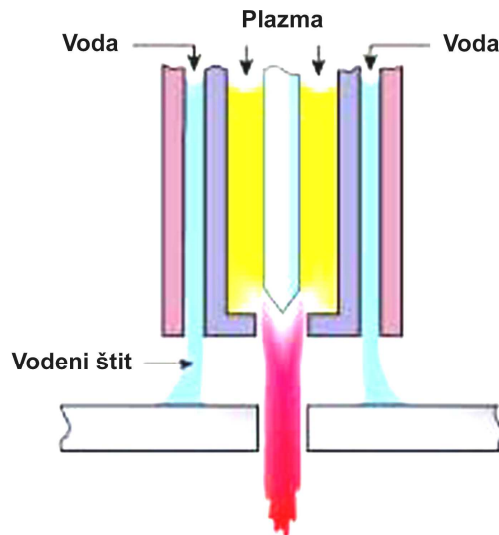


Slika 2.5. Plazma rezanje s injektiranom vodom [2]

Postupak se koristi kod struja od 260 do 750 A za visokokvalitetno rezanje raznih materijala i debljina. Primjenjuje se samo za strojni mehanizirani postupak rezanja. Pored dušika, za plazmeni plin može se koristiti i zrak što čini postupak bitno jeftinijim. Fizikalno, dušik je najpovoljniji za korištenje zbog svoje sposobnosti prijenosa topline iz električnog luka na radni komad. Unatoč visokim temperaturama na mjestu gdje se voda ubrizgava u električni luk, manje od 10 % vode isparava. Ostatak vode, osim navedenih poboljšanja, služi i za hlađenje gornje površine radnog komada. Isto tako, ovo dodatno hlađenje sprječava nastajanje oksida na površini reza i pridonosi učinkovitom hlađenju sapnice na mjestu najvećeg toplinskog opterećenja [2, 7].

2.2.2.3. Plazma rezanje pod zaštitom vode

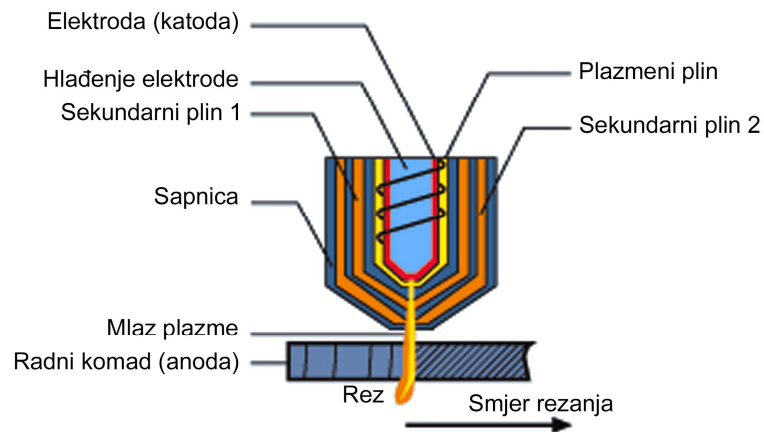
Plazma rezanje pod zaštitom vode je vrsta plazma rezanja sa sekundarnim medijem, gdje se umjesto zaštitnog plina koristi voda koja pruža bolje hlađenje sapnice i radnog komada te bolju kvalitetu reza kod rezanja nehrđajućih čelika. *Slika 2.6.* prikazuje plazma rezanje pod zaštitom vode. Postupak se koristi samo kod strojnog mehaniziranog rezanja [2, 7].



Slika 2.6. Plazma rezanje pod zaštitom vode [2]

2.2.3. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka

Ovim postupkom dobija se vrlo kvalitetan rez kod rezanja tanjih materijala (do 12 mm) pri manjim brzinama. Poboľšana kvaliteta reza je rezultat korištenja tehnologije povećanog sužavanja luka, odnosno povećanja gustoće energije električnog luka, dok su manje brzine rezanja potrebne kako bi se ostvarili precizniji pomaci kod rezanja. Slika 2.7. prikazuje plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka.



Slika 2.7. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka – precizno plazma rezanje [2]

Cilj rezanja plazmom je dobivanje dvije planparalelne, ravne površine reza koje su prikladne za daljnju uporabu bez potrebne međuoobrade odnosno naknadne obrade nakon rezanja. Ali, ipak površina reza ima određeno odstupanje od toga idealnog oblika.

Posebno u području tankih limova – do približno 5 mm debljine, odstupanje može, ovisno o materijalu, razmaku pištolja, jačini struje i brzini rezanja, iznositi do 10°. Korištenjem novorazvijenog postupka preciznog rezanja plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka (tzv. HiFocus rezanje) odstupanje od pravoga kuta značajno se reducira. HiFocus tehnologija omogućuje dobivanje približno okomitih površina reza za debljine limova od 0,8 do 8 mm i time postizanje značajno veće točnosti. HiFocus tehnologija zasniva se na principu rezanja plazmom sa suženim i stabiliziranim plazmenim mlazom. To se postiže primjenom sapnica manjeg promjera, povećanom rotacijom plazmenog plina i dodatnom primjenom rotirajućeg plina koji do plazmenog luka dolazi kroz koaksijalnu sapnicu bez potencijala. Sapnica za rotirajući plin sprječava i nastajanje tzv. dvostrukih električnih lukova i uništenje sapnice kapljicom rastaljenog metala koje nastaje zbog štrcanja prilikom bušenja rupa [6].

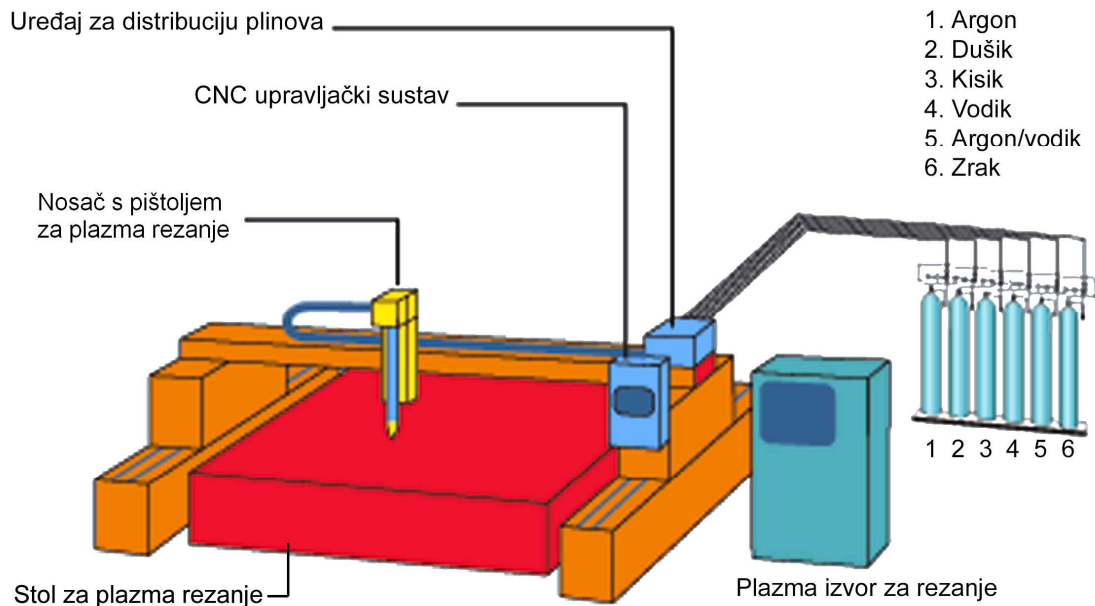
Za mnoge primjene, visoka kvaliteta reza i preciznost, koja se postiže HiFocus tehnologijom, predstavlja što se troškova tiče povoljniju alternativu u odnosu na rezanje laserom. Pomoću HiFocus uređaja i postrojenja za rezanje plazmom, može se održavati tolerancija radnog komada $\pm 0,2$ mm [6].

Područje upotrebe HiFocus plazma uređaja je višestruko [6]:

- S tehnologijom „HiFocus – Quality“ postiže se kvaliteta reza usporediva s laserom, kod rezanja konstrukcijskih čelika i aluminijskih legura debljine od 1 do 8 mm; struja rezanja 20 do 50 A.
- S tehnologijom „HiFocus – Speed“ postiže se veća produktivnost kod rezanja konstrukcijskih čelika debljine 4 – 10 mm, ali je tada odstupanje reza od pravog kuta minimalno povećano; struja rezanja 50 – 100 A.
- FineFocus tehnologija koristi se sa strujama 40 – 130 A, kako za rezanje konstrukcijskih čelika tako i za rezanje Cr-Ni čelika i aluminijskih legura, za limove debljine od 6 do 25 mm.

2.3. Sustav za plazma rezanje

Cilj sustava za plazma rezanje je jeftino rezanje radnih komada i to u što kraćem vremenu s što boljom kvalitetom rezanja. Isto tako, uravnoteženje troškova, kvalitete rezanja i brzine sustava može postati teško kada se projektira ili poboljšava učinkovitost sustava za rezanje. Zbog toga, jako je bitno da svatko tko koristi sustav za plazma rezanje bude u potpunosti svjestan njegove funkcionalnosti. Razumijevanjem i optimiranjem svojstava svake komponente sustava za rezanje, jako brzo se može stvoriti visokokvalitetan proizvod s relativno malim troškovima rezanja. *Slika 2.8.* prikazuje sustav strojnog rezanja plazmom.



Slika 2.8. Sustav strojnog plazma rezanja [2]

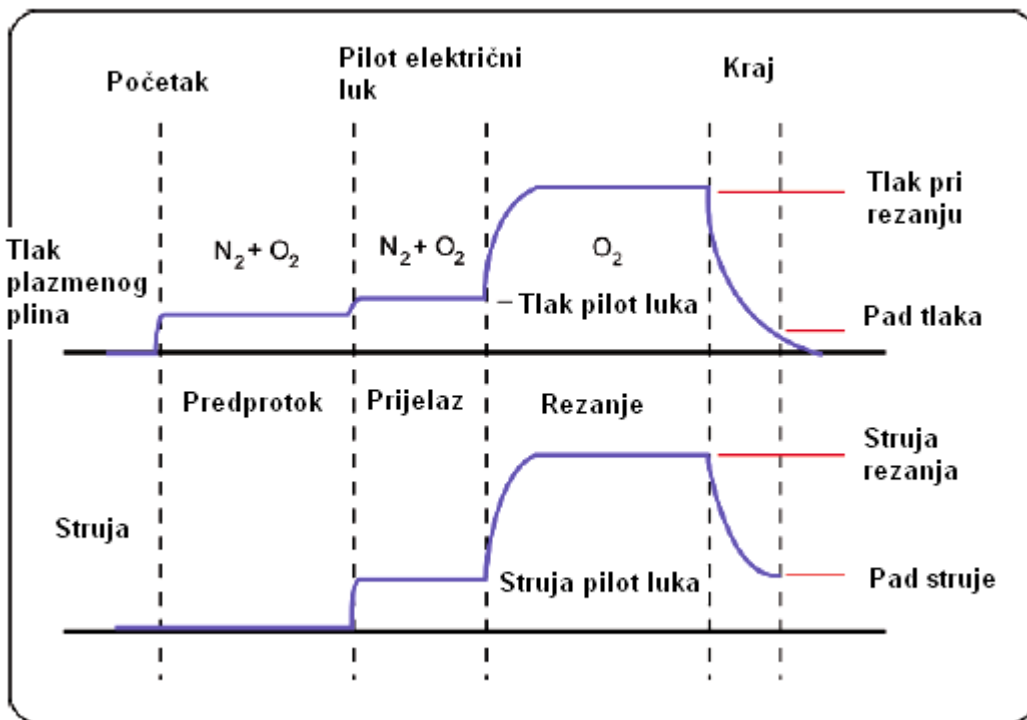
2.3.1. Izvor za plazma rezanje

Izvor za plazma rezanje je najbitniji dio plazma sustava za rezanje. Izvor za plazma rezanje određuje vrstu plazmenog ili zaštitnog plina koji se može koristiti pri rezanju. Kako je kvaliteta reza radnog komada presudna pri proizvodnji nekog proizvoda, potrebno je provjeriti koji se plinovi i njihove mješavine mogu koristiti s određenim izvorom za plazma rezanje. Nadalje, ukoliko postoji problem s mijenjanjem struje ili protokom plina tijekom rezanja, vijek trajanja sustava, kao i kvaliteta rezanja će biti smanjena. Općenito gledajući, izvori za plazma rezanje koji pomoću mikroprocesorskog kontrolera imaju mogućnost povećavanja struje i tlaka plina na početku rezanja, kao i mogućnost smanjenja tih parametara na kraju rezanja, produžuju vijek trajanja potrošnih dijelova sustava za rezanje. Neoštećeni potrošni dijelovi sustava doprinose dobivanju kvalitetnog reza za dulje vrijeme trajanja proizvodnje.

Takav kontroler omogućuje:

- početak protoka plinske mješavine ($O_2 + N_2$) u trenutku paljenja električnog luka što čini paljenje luka bržim i lakšim te sprječava preveliko trošenje elektrode,
- kontrolu povećavanja struje rezanja i intenziteta protoka plina što smanjuje toplinsko opterećenje katode te samim time produžuje njen vijek trajanja,
- kontrolu smanjenja struje rezanja i intenziteta protoka plina na kraju procesa rezanja što omogućuje skrućivanje oksida katode prije njihovog „uklanjanja“ s površine katode [10].

Slika 2.9. prikazuje algoritam mikroprocesorskog kontrolera.



Slika 2.9. Algoritam mikroprocesorskog kontrolera [8]

Stariji izvori za plazma rezanje bili su robusne građe, sadržavali su fiksni mosni ispravljač sastavljen od serijski spojenih dioda, uz pomoć kojih se preko transformatora izmjenična struja pretvarala u istosmjernu struju. Ovakvi sustavi su davali velike snage, ali i bilo je dosta izgubljene energije te su imali mnogo odstupanja u izlaznoj snazi. Kasnije su razvijeni silicijski – kontrolirani ispravljači, a samim time i novi promjenjivi plazma izvori snage. Takvi izvori su direktno preko transformatora pretvarali trofaznu izmjeničnu struju u istosmjernu struju, pogodnu za postupak rezanja. Takvi sustavi su također bili masivni, a koristili su se u sustavima s visokim strujama rezanja te nisu bili pogodni za ručne aplikacije plazma rezanja.

Nakon toga došlo je do razvitka preklopnih modula izvora snage, koji su nakon ispravljača koristili i tranzistore za podešavanje istosmjerne struje. „Čoperi“ su vrsta preklopnih izvora snage koji koriste poluvodičke uređaje kao što su bipolarni tranzistori, koji ispravljaju istosmjernu struju s odstupanjima te dobivamo vrlo glatku izlaznu krivulju snage.

Drugi tip preklopnih izvora snage su inverteri. Oni koriste takve tranzistore kojima se povećava frekvencija izmjenične struje, a time se omogućuje korištenje manjeg transformatora. Zbog korištenja manjih transformatora inverteri su mnogo lakši i pokretniji od konvencionalnih izvora plazma energije što ih čini prikladnim i za ručne aplikacije.

Današnji izvori su većinom konstruirani s inverterskom tehnologijom i imaju odlične mogućnosti integriranja s robotiziranim CNC sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza [8 – 10].

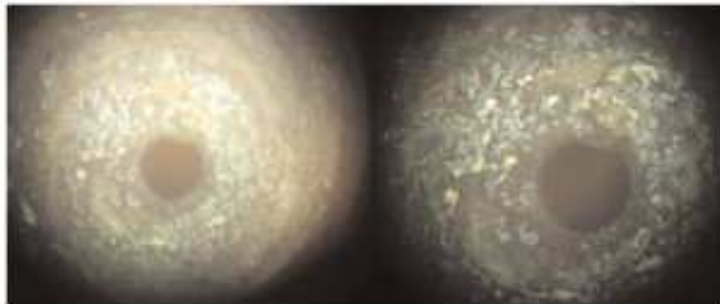
2.3.2. Pištolj za plazma rezanje

Kod procesa plazma rezanja koriste se ručno vođeni ili mehanizirano upravljivi plazma pištolji. Postoji nekoliko različitih vrsta i veličina jednih i drugih, a biraju se ovisno o debljini radnog komada. Ukoliko se želi postići što bolja kvaliteta rezanja udaljenost pištolja od radnog komada se mora održavati u jako niskim tolerancijama. Neki mehanizirani plazma pištolji su opremljeni s automatskim kontrolnim uređajima kako bi se održala konstantna udaljenost, odnosno razmak između vrha pištolja i radnog komada.

Plazma pištolj konstruiran je tako da različiti plinovi, bilo plazmeni ili zaštitni, i električna struja mogu istodobno prolaziti kroz sami pištolj bez ikakvog utjecaja jedne veličine na drugu. Pištolji većinom imaju vanjsku oplatu koja štiti unutarnje dijelove pištolja od topline uzrokovane električnim lukom. Isto tako pištolj sadrži izvedben sustav kanalice za razne plinove (plazmene, zaštitne) koji su propisno odvojeni i zatvoreni jedan od drugoga te sadrži izolacijske materijale kako bi se spriječilo stvaranje električnog luka unutar samog plazma pištolja. Glavni potrošni materijali u pištolju su elektroda, sapnica, dovodnik plina, zaštitna navlaka. Što su kvalitetniji i dugotrajniji potrošni materijali plazma pištolja, bolja je i kvaliteta rezanja.

Elektroda – zatajenje elektrode pojavljuje se kada se emitirajući element tako istroši da se emitirani električni luk počinje odbijati od okružujuće bakrene ili srebrene navlake. Jednom kada električni luk dođe u kontakt s tom navlakom, može doći do uništenja cijele elektrode. Kao emitirajući element elektrode u neoksidirajućim okolinama koristi se volfram, dok se hafnij preferira pri rezanju s kisikom [11].

Sapnica – konstrukcija elemenata sapnice je najvažnija za postizanje optimalne kvalitete rezanja. Sapnica je tako konstruirana da je njen otvor malo veći od promjera fokusiranog ionizirajućeg plina. To omogućava da sapnica sadrži i fokusira plazmeni mlaz bez nepovoljnog djelovanja na samu sapnicu. Kvaliteta rezanja se smanjuje kada je vanjski ili unutarnji dio otvora sapnice oštećen. Oštećenje unutarnjeg dijela sapnice može biti uzrokovano pregarenjem elektrode, problemima oko paljenja luka ili protoka plina, ili postavkom struje koja je prevelika ili preniska. *Slika 2.10.* prikazuje oštećenje unutarnjeg dijela sapnice. Oštećenje vanjskog dijela sapnice može biti uzrokovano prevelikim štrcanjem metala koje se pojavljuje zbog male udaljenosti pištolja i radnog komada ili pri probijanju debljih materijala. Isto tako do oštećenja vanjskog dijela sapnice može doći zbog problema uspostavljanja električnog luka, između elektrode i radnog komada. *Slika 2.11.* prikazuje oštećenje vanjskog dijela sapnice. Zaštitna navlaka sprječava oštećenje sapnice tijekom postupka rezanja. Otvor navlake je ključna značajka zaštite, ako je oštećen, može doći do negativnog utjecaja na protok plazmenog ili zaštitnog plina, samim time i do loše kvalitete reza [8, 11 – 12].



Slika 2.10. Oštećenje unutarnjeg dijela sapnice [11]



Slika 2.11. Oštećenje vanjskog dijela sapnice [11]

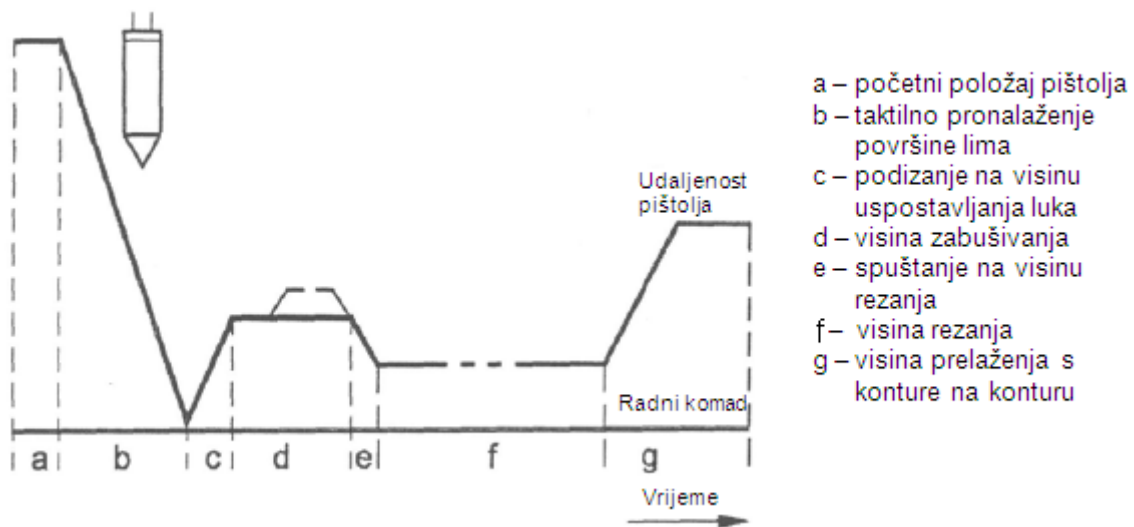
Dovodnik plina – ovaj dio plazma pištolja je jako bitan jer kreira vrtlog plazmenih plinova i održava ga centričnim s vrhom elektrode i središtem otvora sapnice. Tlak plazmenog plina utječe na vijek trajanja elektrode. Visoki tlakovi uzrokuju brzo trošenje elektrode, dok niži tlakovi plinova produžuju vijek trajanja elektrode. Gustoća vrtloga plinova kreiranog s dovodnikom plina direktno utječe na tlak plazmenog plina. Visoka gustoća vrtloga sužava električni luk, povećava tlak plina te doprinosi visokoj kvaliteti rezanja. Dok manje gustoće vrtloga omogućavaju dulji vijek trajanja elektrode, ali i slabiju kvalitetu reza. Dovodnik plina (najčešće neki oblik prstena) je najčešće napravljen od visokotemperaturne plastike s rupicama pod određenim kutem, kako bi mogao uzrokovati rotaciju plinova [11].

2.3.2.1. Regulacija visine pištolja za plazma rezanje od radnog komada

Za kvalitetu reza kod rezanja plazmom, između ostalog od velikog je značaja optimalno podešen i duž cijelog reza konstantno održavan razmak između pištolja i radnog komada. Za postizanje ravnomjerne širine reza i ponovljive geometrije, odnosno dimenzija radnih komada, potrebno je imati točnu regulaciju udaljenosti između pištolja i radnog komada. Regulacija udaljenosti omogućuje da se plazma pištolj uvijek nalazi na istoj udaljenosti od radnog komada, bilo da je uzorak valovit ili da neravno naliježe.

Isti zahtjevi vrijede i za proces bušenja (probijanja) koji čuva sapnicu od štrcanja, posebno u području srednjih i velikih debljina limova. Pogrešni procesi bušenja dovode do povećanog trošenja sapnice, prekidanja procesa rezanja i loših rezultata rezanja. U pravilu se na početku rezanja, pomoću taktilnog senzora odredi položaj plazma pištolja tako da se pištolj primiče limu, dok taktilni senzor ne dodirne površinu lima. Kada senzor dotakne površinu materijala, zatvara se električni krug i računalo je obavješteno da je rezna glava postavljena na visinu bušenja, koja je viša od visine rezanja kako bi se spriječilo štrcanje vrućeg metala direktno u sapnicu. Kad završi bušenje, glava se pomiče na visinu rezanja i započinje rezanje. Optimalna visina bušenja, odnosno rezanja te optimalna brzina rezanja ovise o vrsti plinske mješavine i materijalu koji se reže. *Slika 2.12.* prikazuje tijek gibanja pištolja kod CNC upravljano rezanja plazmom.

Kad jednom započne rezanje plazmom, udaljenost između vrha pištolja i površine materijala održava se očitavanjem napona prenesenog električnog luka, u procesu koji se zove automatska regulacija visine. Za postizanje visoke kvalitete reza važno je održavati konstantnu udaljenost između pištolja i površine materijala pomoću odgovarajućeg sustava automatske regulacije. Napon u luku se stalno provjerava, a očitavanja se koriste za podešavanje Z osi prema gore ili dolje ovisno o očitanoj napona. Rezultat je kvalitetan rez koji ne zahtijeva intervenciju korisnika [6, 9].



Slika 2.12. Tijek gibanja pištolja kod CNC upravljano rezanja plazmom [9]

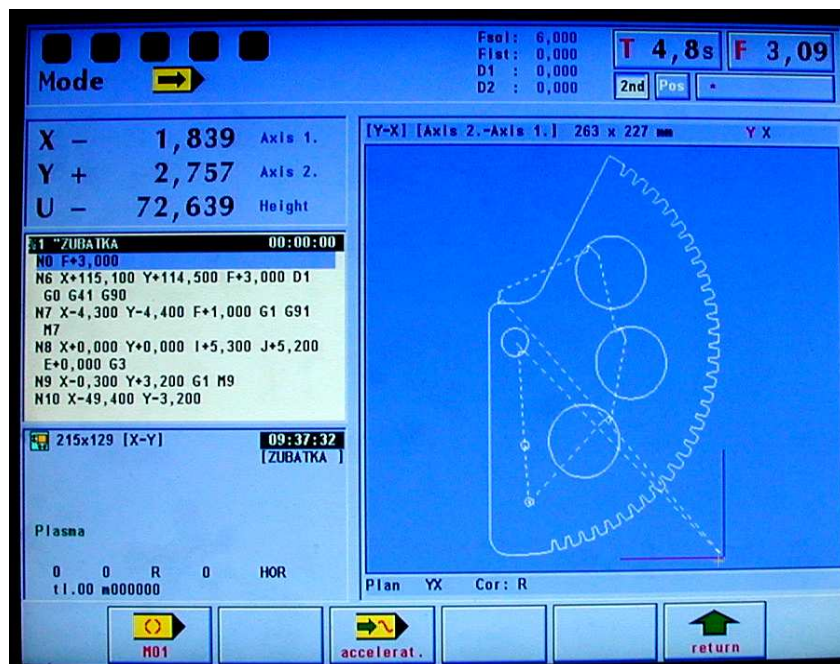
2.3.3. Sustav za vođenje

Sustav za vođenje ima jednako veliki utjecaj na kvalitetu reza kao i „alat“ – plazmeni mlaz. Za postizanje visoke kvalitete reza u pravilu se koriste CNC upravljani koordinatni sustavi te roboti. Sustav za vođenje mora imati pogone s dovoljnom dinamikom kako bi brzo postigao zadanu brzinu rezanja.

Od velikog je značaja točno upravljanje slijedećim fazama rezanja:

- početak i kraj rezanja, posebno kod unutarnjih kontura,
- prelaženje preko reza,
- gibanje po kutevima [6].

Sustav za vođenje i plazma uređaj povezani su preko sučelja, putem kojeg se provodi potrebna izmjena informacija. *Slika 2.13.* prikazuje kontrolni CNC sustav za plazma rezanje VANAD MEFI, smješten u Laboratoriju za zavarivanje (FSB). U potpuno automatiziranom pogonu ima smisla napraviti datoteku s podacima za automatsko određivanje tehnoloških parametara, na temelju vrste i debljine materijala. U memoriji računala postoje standardne konture, odnosno ponuđeni programi najčešće korištenih oblika predmeta koje treba izrezati. Kada se izabere geometrijski oblik predmeta, potrebno je upisati brzinu rezanja, dimenzije predmeta, način započinjanja reza te da li se želi izrezati rupu ili vanjsku konturu. Kada se reže više jednakih komada, funkcija krojenja omogućava optimalno iskorištenje površine ploče. Također se mogu koristiti tehnološke tablice za automatsko podešavanje uvjeta rezanja. Za dobivanje točnih dimenzija potrebno je odrediti kompenzaciju širine reza. Kompenzacija rezanja u kutevima i radijusima sukladno debljini lima koristi se da ne dođe do propaljivanja, odnosno pada kvalitete rezanja na tim mjestima. Kada se želi izrezati kontura složenog geometrijskog oblika koju je potrebno programirati, koristi se suvremeni programski paket za CAD/CAM pripremu programa za toplinsko rezanje. Programirana kontura može se pohraniti u računalu. Tako kreirana kontura, može se učitati u računalu CNC stola pomoću diskete ili preko mrežnog priključka [8, 9].



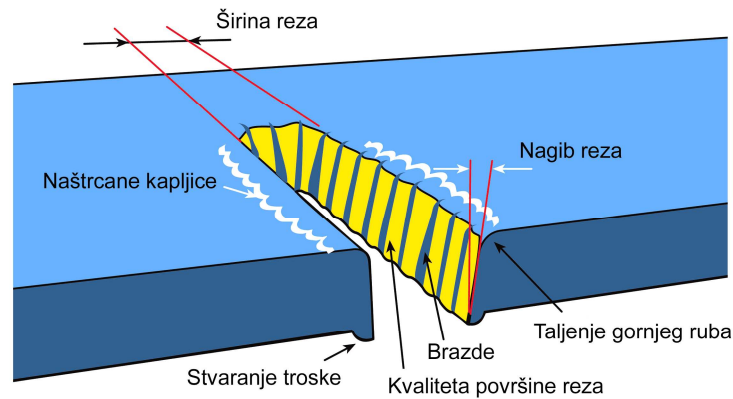
Slika 2.13. Kontrolni CNC sustav za plazma rezanje VANAD MEFI (FSB – Laboratorij za zavarivanje) [9]

Čimbenici koji utječu na sustav vođenja i upravljanja:

- *Visoka dinamika gibanja pištolja* – ubrzanja i usporenja utječu na ispravnost kontura reza.
- *Njihanje pištolja* – utječe na konstantnost širine reza i hrapavost širine reza.
- *Udaljenost pištolja od radnog komada* – konstantna udaljenost smanjuje odstupanja u mjerama i pojavu srha.
- *Programiranje procesa rezanja* – bitan je utjecaj početka i kraja reza te broja prolazaka preko reza na samu stabilnost plazmenog luka i ujednačenost rezne površine.
- *Stanje površine radnog komada i potencijalna kolizija pištolja i radnog komada* [13].

2.4. Utjecaj parametara na kvalitetu plazma rezanja

Neodgovarajuća kvaliteta reza zahtijeva naknadnu obradu i povisuje troškove proizvodnje. Zato je od odlučujuće važnosti poznavanje djelovanja utjecajnih čimbenika na kvalitetu rezanja. *Slika 2.14.* prikazuje izgled reza kod plazma rezanja sa svim značajkama.



Slika 2.14. Izgled reza kod plazma rezanja [14]

Osnovno svojstvo reza je njegova širina, odnosno količina metala koja je uklonjena mlazom plazme. U pravilu širina reza je 1 do 2 puta veća od promjera otvora sapnice. Čimbenici koji utječu na širinu reza u odnosu na veličinu sapnice jesu brzina rezanja, jačina struje rezanja i udaljenost sapnice od radnog komada [14].

Drugo važno svojstvo kvalitete reza je nagib reza (kut površine reza). Ako je površina reza od gornje do donje površine radnog materijala točno pod 90° , tada je kut površine reza jednak nuli. Kod korištenja vrtložnih plinova kao zaštite pri rezanju, nagib reza na gornjoj strani materijala iznosi 1 do 3° , a 3 do 8° na donjoj strani radnog materijala. Kod laminarnog strujanja zaštitnih plinova, nagib na obje strane radnog materijala iznosi 4 do 8° . Udaljenost sapnice može znatno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači i manji nagib reza. Isto tako smanjivanjem brzine rezanja može se također smanjiti nagib reza.

Zakrivljenost gornjeg ruba reza ovisi o debljini materijala te o samom izboru postupka plazma rezanja i zaštitnog plina. Do zakrivljenosti dolazi zato što plazmeni mlaz ima najvišu temperaturu na mjestu izlaza iz sapnice odnosno na gornjoj strani radnog materijala. Zakrivljenost se najviše pojavljuje kod plazma rezanja tanjih materijala. Primjenom zaštitne atmosfere (plin, voda) zakrivljenost se može svesti na minimum.

Srh (troska) uglavnom nastaje na dnu reza, a ovisi o brzini rezanja, struji rezanja te vrsti i debljini materijala. I prevelika i premala brzina rezanja mogu uzrokovati nastajanje srha, a time i dodatne troškove uklanjanja, zbog čega je nužno namjestiti optimalne parametre rezanja. Isto tako, uz sam vrh reza može doći do nakupljanja manje količine srha (naštrcane kapljice) koja nastaje kao posljedica male brzine rezanja, prevelikog razmaka sapnice od radnog materijala ili istrošenosti sapnice [12].

Zona utjecaja topline (ZUT) pri plazma rezanju je područje oko površine reza koje je procesom rezanja došlo pod utjecaj topline. ZUT pri plazma procesima rezanja je relativno uzak, ponajprije zbog uskog fokusa plazmenog mlaza i brzine samog procesa. Primjenom plazma rezanja pod vodom ZUT se smanjuje.

Nepravilnosti koje se javljaju i njeni uzroci pri plazma rezanju konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika i Al – legura navedene su u *tablici 2.1*. S time da treba napomenuti da gornji rub reza čini $1/3$ debljine lima, dok donji rub čine preostale $2/3$ debljine lima.

Tablica 2.1. Nepravilnosti kod plazma rezanja [15]

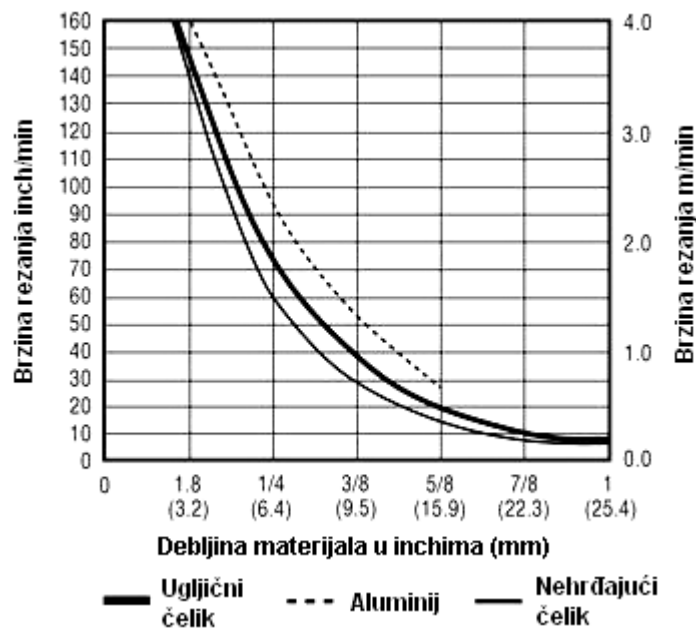
Nepravilnosti	Vrste materijala		
	Konstruktivski čelik	Nehrđajući čelik	Al – legura
Zaobljen gornji rub	Prevelika brzina, Preveliki razmak	Prevelika brzina, Preveliki razmak	Rijetko se javlja
Srh na gornjem rubu	Preveliki razmak, Lako otklanjanje	Preveliki razmak, Lako otklanjanje, Pogrešna koncentracija vodika	Preveliki razmak, Lako otklanjanje
Hrapavost na gornjem rubu	Rijetko se javlja	Pogrešna koncentracija vodika, Razmak i brzina	Premali protok vodika
Nagib (pozitivan)	Prevelika brzina, Preveliki razmak	Prevelika brzina, Preveliki razmak, Premalo vodika	Prevelika brzina, Premali protok vodika
Nagib (negativan)	Rijetko se javlja	Rijetko se javlja	Previše vodika
Neravnine blizu donjeg ruba	Rijetko, ponekad kod prebrzog starta	Samo na granici optimalnih parametara	Rijetko se javlja
Neravnine blizu gornjeg ruba	Previše vodika	Previše vodika	Premala brzina, Premalo vodika
Konkavne stranice	Rijetko se javlja	Previše vodika	Previše vodika, Premala brzina
Konveksne stranice	Prevelika brzina	Prevelika brzina, Premalo vodika	Rijetko se javlja
Zaobljen donji rub	Prevelika brzina	Rijetko se javlja	Rijetko se javlja
Srh na donjem rubu	Previše vodika, Prevelika brzina	Previše vodika, Premala brzina	Prevelika brzina
Hrapavost na donjem rubu	Premali razmak	Rijetko se javlja	Premalo vodika

Najvažniji parametri procesa koji najviše utječu na kvalitetu pri rezanju plazmom su:

- jakost struje,
- tlak plina,
- brzina rezanja,
- (is)trošenje katode,
- (is)trošenje sapnice [6].

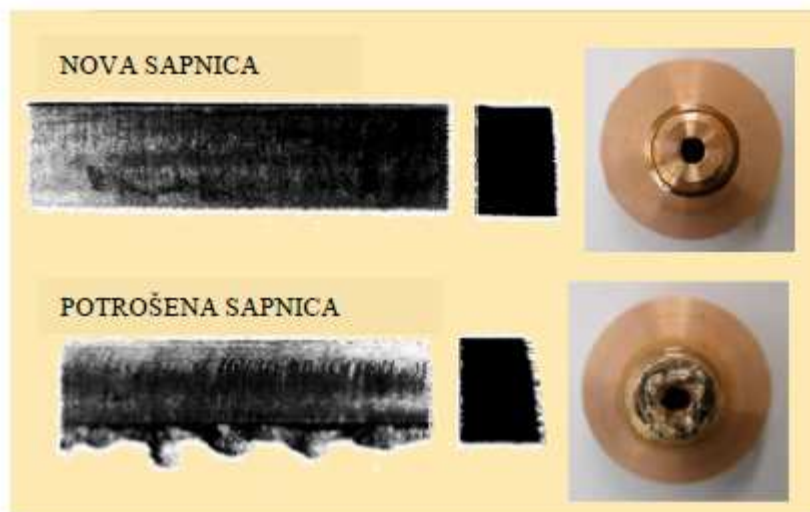
Jakost struje ovisi o materijalu koji se reže te o veličini sapnice. Kako bi se povećala produktivnost i brzina rezanja koristi se najveća sapnica te najveća struja koju sustav vođenja sapnice dozvoljava. Kako bi se optimizirala kvaliteta reza potrebno je rezati manjim brzinama, s manjom sapnicom i manjom jakosti struje što kao rezultat daje ravniji (s malim nagibom) i kvalitetniji rez. Veličina sapnice ovisi o jakosti struje rezanja. Promjer sapnice od 1.5 mm će podnositi struju od 100 A, dok će sapnica promjera od 6 mm moći podnositi struju od 1000 A. Jakost struje treba biti takva da se ostvaruje 95% izlazne snage na sapnici. Manja izlazna snaga, odnosno manja jakost struje od one za koju je sapnica predviđena imati će kao posljedicu manju energiju plazmenog mlaza, nefokusirani mlaz te prljav rez. S druge strane prevelika izlazna snaga, odnosno jakost struje imati će za posljedicu slabiji luk i grublju površinu reza [14].

Brzina rezanja koja je premala ili prevelika uzrok je lošoj kvaliteti reza. Kod rezanja različitih materijala postoje optimalni uvjeti koji će osigurati ravan i čist rez bez srha. Ako je brzina rezanja prevelika luk će zaostajati i oscilirati što će uzrokovati stepeničaste brazde u obliku slova S, veliki nagib reza te nastajanje srha na donjoj strani reza. Srh koji nastaje kao produkt prevelike brzine reza je teško ukloniti te se zahtijeva naknadno brušenje. Ako je brzina prevelika može doći i do toga da plazma ne penetrira skroz kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao srh koji je lako ukloniti za razliku od srha koji nastaje kod prevelike brzine rezanja. Najbolji način procjene brzine rezanja je promatrati luk koji bi trebao biti vertikalno u odnosu na radni materijal, odnosno nagib luka na izlaznom bridu bi trebao biti nula. Poznavajući brzinu rezanja za određene debljine i vrste materijala može se lako odrediti kapacitet proizvodnje, koji je najčešće izražen u metrima reza po satu. *Slika 2.15.* prikazuje ovisnost brzine rezanja o debljini materijala.



Slika 2.15. Brzina rezanja u ovisnosti o debljini materijala [16]

(Is)trošenje sapnice ima najveći utjecaj na okomitost reza i toleranciju nagiba te na pojavu srha po reznom rubu. Slika 2.16. prikazuje utjecaj stanja potrošenosti sapnice na stanje rezne površine i pojavu srha s naličja reza. Na drugom je mjestu (is)trošenje katode. U razmatranju interakcija između parametara može se zaključiti najveći utjecaj brzine rezanja i jakosti struje na pravokutnost reza te njegovu širinu [6, 13, 16].



Slika 2.16. Utjecaj stanja potrošenosti sapnice na stanje rezne površine i pojavu srha s naličja reza [13]

2.5. Tehnički plinovi pri plazma rezanju

Uz sve prije navedene utjecajne čimbenike, ključni utjecaj na stabilnost i brzinu procesa rezanja i na kvalitetu tako dobivenih reznih površina imaju tehnički plinovi koji se koriste u procesu, bilo da se radi o plazmenim ili zaštitnim plinovima. U cilju postizanja ekonomičnog procesa rezanja i zahtijevane kvalitete rezanja potreban je pravilan odabir plazmenog plina/mješavine za određeni materijal. Pri odabiru tehničkog plina najvažniju ulogu imaju njegova fizička svojstva, kao što su ionizacija i energija disocijacije, toplinska vodljivost, atomska težina i kemijska reaktivnost.

Zrak je najsvestraniji plazmeni plin te omogućava dobru kvalitetu i brzinu rezanja nelegiranih i nehrđajućih čelika, kao i aluminijskih. Zrak isto tako smanjuje troškove rezanja jer nije potrebna njegova nabavka. Komprimirani korišteni zrak treba biti očišćen od svih nečistoća, kao što su čestice ili vlaga. Glavne komponente zraka su dušik ($\approx 70\%$) i kisik ($\approx 21\%$). S upotrebom zračne plazme može doći do pojave nitracije i oksidacije površine reza, što kasnije može uzrokovati poroznost u zavarenim spojevima.

Argon pripada grupi inertnih plinova, što znači da kemijski ne reagira s materijalom tokom procesa rezanja. Njegova visoka atomska težina (najveća od svih plinova) pridonosi visokoj energiji za ispuhivanje taline, dok niska energija ionizacije omogućava laganu uspostavu luka. Rezultat toga je visoka kinetička energija plazmenog mlaza. Argon se većinom koristi u mješavinama, zbog njegove male toplinske vodljivosti te njegove veće cijene.

Vodik, nasuprot argonu, ima vrlo dobru toplinsku vodljivost. Nadalje, vodik disocira pri visokim temperaturama. To znači da se velika većina energije povlači s električnog luka, što rezultira suženjem električnog luka te mogućnošću postizanja veće gustoće energije. Zbog male atomske težine čisti je vodik neprikladan za korištenje te tako ne može proizvesti dovoljnu kinetičku energiju za ispuhivanje taline metala.

Dušik s materijalom reagira samo pri visokim temperaturama, dok pri niskim temperaturama ostaje inertan. Što se tiče fizikalnih svojstava, odnosno toplinske vodljivosti i atomske težine, nalazi se između argona i vodika. Kao dodatak argonu povećava toplinsku vodljivost i kvalitetu reza. Još uvijek je najbolje rješenje pri rezanju aluminijskih i nehrđajućeg čelika. Općenito govoreći, upotreba zraka kao sekundarnog medija je najbolja kombinacija pri plazma rezanju dušikom.

Isto tako, moguće je i korištenje vode kao sekundarnog medija, čime se dobija jako glatka površina reza nehrđajućih čelika i aluminijsa te manje deformacije samog radnog komada. Ovakova aplikacija zahtijeva uporabu vodenog stola.

Kisik je po svojoj toplinskoj vodljivosti i atomskoj težini jednak dušiku. Kisik djeluje oksidirajuće na talinu te se proizvodi dodatna toplina koja može povećati brzinu rezanja. Kisik kao plazmeni plin je postao standardan pri rezanju ugljičnih čelika te pritom daje najbolju kvalitetu rezanja i najveću brzinu rezanja od svih plazmenih plinova. Upotreba kisika pri rezanju ugljičnih čelika daje fini mlaz taline metala, smanjujući površinsku napetost svake kapljice metala te tako omogućuje lagano ispuhivanje taline. Nedostatak upotrebe kisika kao plazmenog plina je njegova cijena i vijek trajanja potrošnih materijala plazma pištolja. No, posljednja dostignuća plazma sustava za rezanje omogućuju započinjanje rezanja mješavinom kisika i dušika te nastavak rezanja kisikom, čime se produžuje vijek trajanja potrošnih materijala. Povećani troškovi zbog cijene kisika i smanjenja vijeka trajanja potrošnih materijala se uobičajeno nadoknađuju smanjenjem troškova sekundarnih operacija, kao što je uklanjanje srha i ravnanje kosih površina reza. Isto tako, kisik se može upotrebljavati za rezanje nehrđajućih čelika i aluminijsa, ali se dobija grublja površina reza te se ne preporučuje za rezanje navedenih materijala.

Mješavine plinova dobivaju se miješanjem gore navedenih plinova. Na primjer, dobra toplinska svojstva vodika se mogu kombinirati s velikom atomskom težinom argona. Ovo omogućava rezanje aluminijsa i nehrđajućih čelika, debljina većih od 5 mm, s sadržajem vodika ovisno o debljini materijala (najčešća mješavina: 35% H₂, 65% Ar). Premalo vodika daje grublju površinu reza i zaobljen gornji rub reza, a previše vodika daje glatku gornju stranu reza, ali na donjem rubu ostaje dio rastaljenog metala. Pravilan izbor mješavine Ar/H₂ daje vertikalni rez i glatku, gotovo poliranu površinu reza nehrđajućih čelika. Pritom je također moguća pojava srha na donjem rubu reza. Kao zaštitni plin mješavine Ar/H₂, uobičajeno se koristi dušik. Nedostatak upotrebe ovakove kombinacije plinova za plazma rezanje je visoka cijena [17 – 19].

Rezanje plazmom različitih materijala i debljina ne može se optimalno izvoditi koristeći samo jedan plazmeni plin. Za dobivanje reza koji ne treba naknadnu obradu potrebno je prilagoditi plazmeni i dodatni plin materijalu koji se reže. Djelovanje pojedinih plinova, odnosno plinskih mješavina na kvalitetu reza, a time i na troškove prikazano je u *tablici 2.2.* [6].

Tablica 2.2. Kombinacije plinova kod rezanja plazmom [6, 13]

Materijal	Plazmeni plin	Dodatni plin	Napomena
Konstrukcijski čelik	Zrak	Zrak	moguće stvaranje nitrida na površini reza
	Kisik	Zrak ili kisik	nema stvaranja nitrida na površini reza manje srha nego kod zraka srh se lako uklanja dugi vijek trajanja pomoću XL-Life-Time-sustava
	Kisik	Kisik ili kisik/dušik	kvaliteta reza usporediva s laserom u području tankih limova (HiFocus)
Visokolegirani čelik	Zrak	Zrak	hrapava i oksidirana površina reza malo srha, gotovo okomite površine reza (HiFocus; 1 – 6 mm)
	Argon/vodik	Dušik	glatka i sjajna površina reza pojava srha pri malim debljinama
	Argon/vodik/dušik	Dušik	glatka i sjajna površina reza zbog dušika manji srh ili bez srha
	Dušik	Dušik/vodik	sjajna površina reza bez srha u području tankih limova (od debljina 2 mm) (HiFinox; 0,5 – 6 mm)
Aluminijske legure	Zrak	Zrak	hrapava površina reza
	Argon/vodik	Zrak ili dušik	glatka površina reza nego sa zrakom približno okomita površina reza
	Zrak	Dušik/vodik	okomita površina reza u području tankih limova (HiFocus)

2.6. Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (HRN EN ISO 9013:2003)

2.6.1. Područje primjene

Norma se odnosi na materijale koji su prikladni za plinsko rezanje te rezanje plazmom i laserom. Primjenjuje se za plinske rezove od 3 mm do 300 mm, plazma rezove od 1 mm do 150 mm i za rezove laserom od 0,5 mm do 40 mm. Ova norma uključuje geometrijsku specifikaciju proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće. Geometrijske specifikacije proizvoda su primjenjive ako je napravljena referenca prema normi HRN EN ISO 9013 u crtežima ili relevantnim dokumentima. Isto tako ukoliko se norma primjenjuje za druge postupke rezanja (npr. rezanje vodenim mlazom), mora se naknadno dobiti odobrenje za korištenje norme. Slijedeći dokumenti norme sadrže odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ovih normi [20]:

ISO 1101:1983, Tehnički crteži – Geometrijska odstupanja – Odstupanja oblika, položaja, orijentacije – Definicije, simboli, oznake na crtežu.

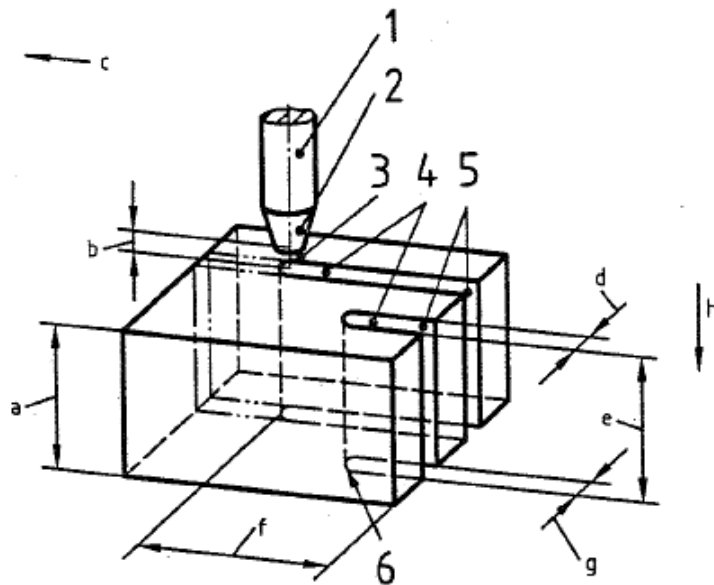
ISO 1302:2002, Geometrijske specifikacije proizvoda – Oznaka sastava površine u tehničkoj dokumentaciji.

ISO 2553, Zavareni, lemljeni spojevi – Prikazivanje na crtežima.

ISO 8015, Tehnički crteži – Osnovni principi označavanja odstupanja.

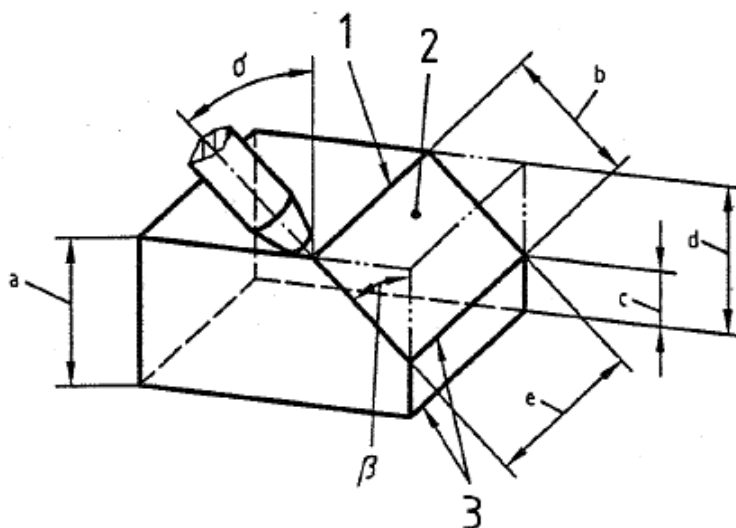
2.6.2. Veličine i definicije objašnjene slikama

Za uporabu ove norme upotrebljavaju se slijedeće veličine i definicije koje su prikazane i objašnjene *slikama 2.17. i 2.18.*. *Slika 2.17.* prikazuje veličine koje se odnose na proces rezanja radnog komada nakon početka samog rezanja, dok *slika 2.18.* prikazuje veličine koje se odnose na gotovi radni komad.



Slika 2.17. Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim veličinama [20]

1 – Pištolj; 2 – Sapnica; 3 – Zraka/Plamen/Električni luk; 4 – Širina reza; 5 – Početak reza; 6 – Kraj reza; a – Debljina radnog komada; b – Udaljenost sapnice od radnog komada; c – Smjer napredovanja rezanja; d – Gornja širina reza; e – Debljina reza; f – Duljina reza; g – Donja širina reza; h – Smjer rezanja.

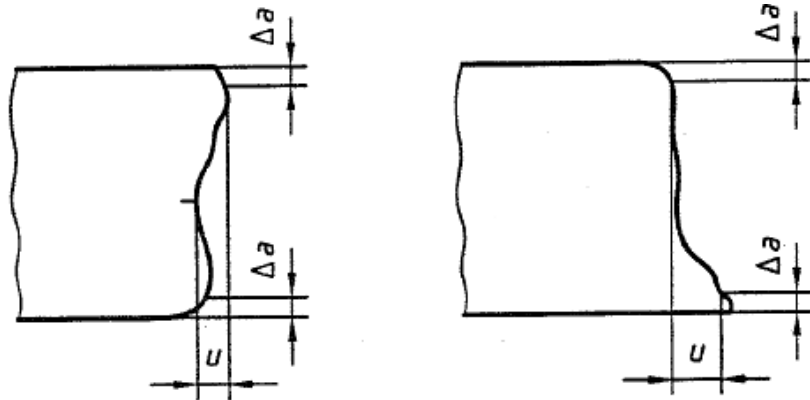


Slika 2.18. Gotovi radni komad s odgovarajućim veličinama [20]

1 – Gornji rub reza; 2 – Površina reza; 3 – Donji rub reza; a – Debljina radnog komada; b – Debljina reza (prva mogućnost); c – Dubina lica korijena/Debljina reza; d – Debljina reza (druga mogućnost); e – Duljina reza; δ – Kut položaja pištolja; β – Kut nagiba reza.

2.6.2.1. Tolerancija okomitosti ili kutnosti

Tolerancija okomitosti ili kutnosti (u) definira se kao udaljenost između dva pravca (tangente) kojima je opisana površina reza, unutar kuta namještanja (npr. 90° u slučaju vertikalnih rezova). Tolerancije kutnosti ili okomitosti ne uključuju samo okomitost nego i odstupanje od ravnosti. Slika 2.19. prikazuje maksimalna odstupanja unutar klase tolerancije.

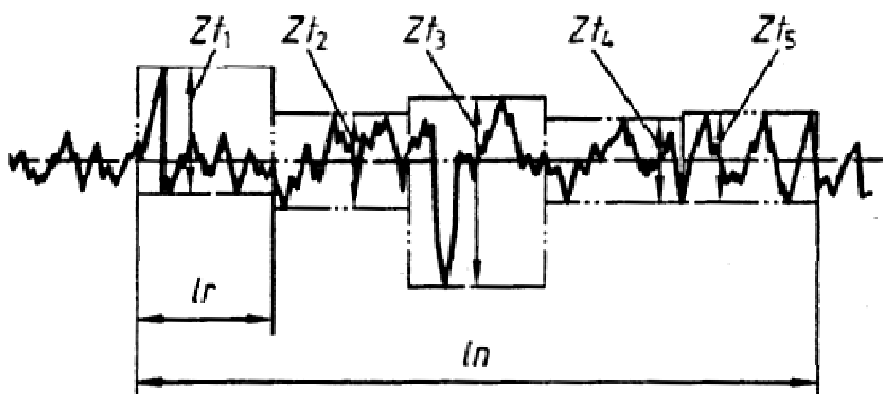


Slika 2.19. Tolerancija okomitosti ili kutnosti [20]

Δa – Smanjenje debljine; u – Tolerancija okomitosti ili kutnosti.

2.6.2.2. Prosječna visina neravnina

Prosječna visina neravnina ($Rz5$) definira se kao aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila. Indeks 5 u $Rz5$ dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata (slika 2.20).



Slika 2.20. Prosječna visina neravnina [20]

$Zt_1 - Zt_5$ – Pojedinačne visine profila; ln – Duljina mjerenja; lr – Pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti (1/5).

2.6.3. Određivanje kvalitete površine reza

Slijedeći zahtjevi iznose i pokazuju procedure mjerenja kao i mjerne instrumente pomoću kojih je moguće odrediti i vrednovati karakteristične vrijednosti reznih površina.

Pri izboru mjernih instrumenata mora se voditi računa da moguće greške ne prelaze 20% vrijednosti od karakterističnih vrijednosti koje trebaju biti izmjerene [20]. *Tablice 2.3. i 2.4.* pokazuju utjecaj kvalitete mjernih instrumenata na karakteristične vrijednosti reznih površina.

Tablica 2.3. Precizni mjerni instrumenti [20]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,02 mm	Vođenje uređaja u smjeru rezanja pod određenim kutem s mjernom urom Kut kontaktne točke igle $\leq 90^\circ$ Polumjer kontaktne točke igle $\leq 0,1$ mm
Rz5	0,002 mm	Točnost mjernog instrumenta, npr. električna kontaktna igla instrumenta za kontinuirano skeniranje u smjeru rezanja

Tablica 2.4. Hrapavi mjerni instrumenti [20]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,1 mm	Tro-kutnik (postoji mogućnost mjerenja pravog kuta prema tri površine u odnosu na kladu mjernog instrumenta), za kose rezove, za ovu namjenu koristi se i mjerni uređaj s točkom osjeta za mjerenje dubine
Rz5	-	

2.6.3.1. Uvjeti za mjerenje

Mjerenja se trebaju izvršiti na brušenoj površini, bez prisutnosti oksida na površini reza i ostalih nesavršenosti. Kao referentni element uzimaju se gornja i donja površina reza radnog komada. Te površine također trebaju biti očišćene. Za definiranje ravnoće, referentni element i ravna mjerna linija trebaju biti centrirane jedna s drugom, tako da maksimalna udaljenost između mjernih linija i stvarne površine bude minimalna.

2.6.3.2. Točka mjerenja

Broj i položaj točaka mjerenja ovisi o obliku i veličini radnog komada i ponekad o namijenjenoj upotrebi. Slijedeći navodi mogu poslužiti kao smjernice.

Rezne površine su klasificirane u polja tolerancija prema maksimalnim izmjerenim vrijednostima. Prema tome, točke mjerenja trebaju biti smještene na mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne izmjerene vrijednosti. Pri odabiru točaka mjerenja treba uzeti u obzir činjenicu da se maksimalne vrijednosti stvarne visine profila i tolerancije okomitosti ili kutnosti mogu naći na različitim mjestima reza. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u donjem dijelu polja tolerancije, trebaju biti izvršena dodatna mjerenja prema vizualnom odabiru mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne vrijednosti. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u gornjem dijelu polja tolerancije ili ako postoje određene sumnje u pogledu dobivenih rezultata, trebaju biti izvršena pomoćna mjerenja na istom broju s dodatnim točkama mjerenja.

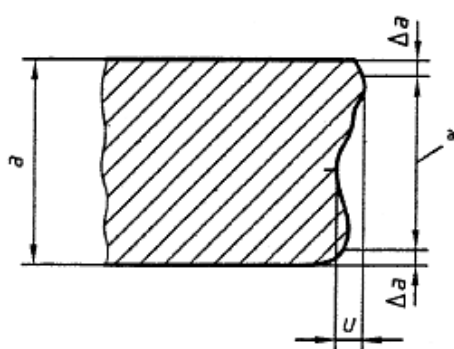
2.6.3.3. Položaj točaka mjerenja

Karakterističnu vrijednost tolerancija okomitosti ili kutnosti moguće je samo odrediti u graničnom području površine reza. Površina se treba smanjivati sa dimenzijom Δa prema *tablici 2.5.* od gornjeg i donjeg ruba površine reza. *Slika 2.21.* prikazuje područje mjerenja tolerancije okomitosti ili kutnosti.

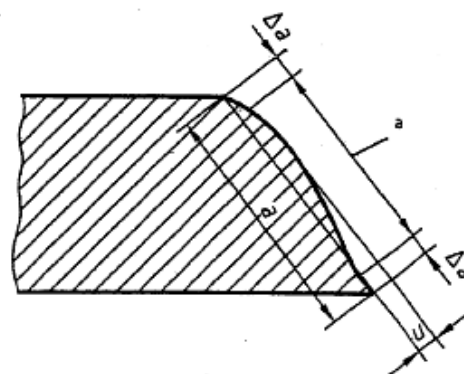
Razlog za smanjenje profila reza je taljenje gornjeg ruba reza.

Tablica 2.5. Dimenzije Δa [20]

Debljina reza, a mm	Δa , mm
≤ 3	0,1 a
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10



a) Vertikalni rez



b) Kosi rez

a – Debljina reza; a – Područje za određivanje tolerancija okomitosti i kutnosti; Δa – Smanjenje debljine; u – Tolerancija okomitosti ili kutnosti.

Slika 2.21. Definicija raspona mjerenja za tolerancije okomitosti ili kutnosti [20]

Za debljine reza ispod 2 mm, procedura mjerenja tolerancija okomitosti ili kutnosti mora biti naknadno dogovorena.

Karakteristična vrijednost prosječne visine neravnina Rz5 može biti određena samo u graničnom području površine reza. Mjerenje se izvršava u točki maksimalne hrapavosti površine debljine reza, u skladu s ISO 4288. Za plinsko rezanje kao i za plazma rezanje, mjerenja se uobičajeno izvršavaju na udaljenostima od oko 2/3 debljine reza od gornjeg ruba reza. Za debljine reza ispod 2 mm, mjerenje se izvršava na udaljenosti od oko 1/2 debljine reza od gornjeg ruba reza.

Prosječna visina neravnina Rz5 treba biti mjerena svakih 15 mm duljine reza u smjeru napredovanja rezanja. Mjerenje treba izvesti u skladu s ISO 4288 koristeći ispitivač koji je opisan u ISO 3274.

2.6.4. Kvaliteta površine reza

Kvaliteta površina reza toplinski obradljivih reznih materijala opisana je slijedećim karakterističnim vrijednostima:

- a) tolerancija okomitosti ili kutnosti, u
- b) prosječna visina neravnina, Rz5.

Mogu se također koristiti slijedeće karakteristične vrijednosti:

- c) rezna linija, n
- d) taljivi gornji rub, r
- e) mogući nastanak troske ili taljivih kapljica na donjem rubu reza.

2.6.4.1. Rasponi mjerenja

Za mjerenje kvalitete reza, rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u, i prosječne visine neravnina, Rz5, trebaju biti naznačeni po redoslijedu u, Rz5. Gdje nije utvrđena vrijednost, treba biti naznačena nula (0).

Ukoliko je uključeno lasersko rezanje, klasifikacija kvalitete je bazirana na rezultatima dobivenima na nelegiranim čelicima.

Pojedine greške, kao neizbježno stvaranje taljivih mjehura na donjem rubu reza, ili ostaci oksida na površini reza nisu uzimane u obzir pri definiranju vrijednosti kvalitete ove norme.

Rasponi, odnosno klase kvalitete za tolerancije okomitosti ili kutnosti prikazane su u *tablici 2.6.* i na *slici 2.22.*

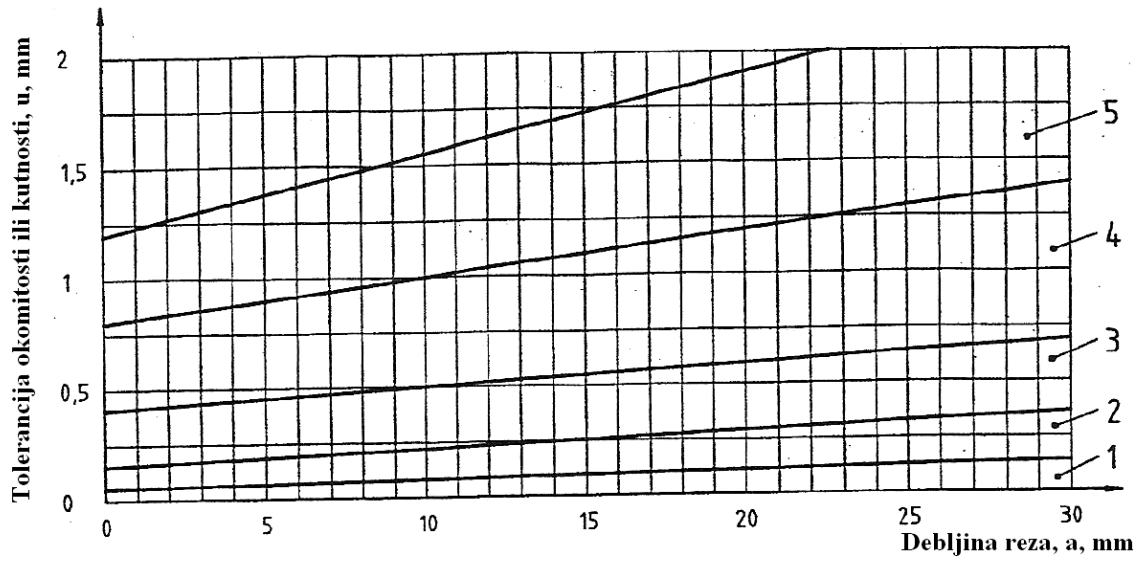
Tablica 2.6. Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u [20]

Klasa	Tolerancije okomitosti ili kutnosti, u, mm
1	0,05 + 0,003a
2	0,15 + 0,007a
3	0,4 + 0,01a
4	0,8 + 0,02a
5	1,2 + 0,035a

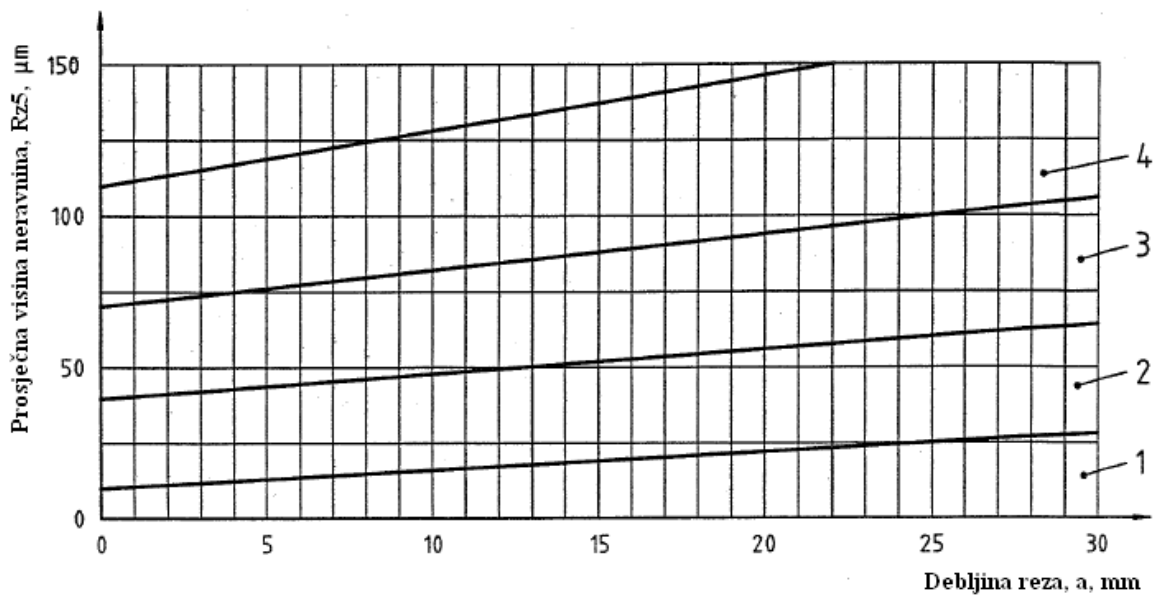
Rasponi, odnosno klase kvalitete za prosječnu visinu neravnina Rz5 prikazane su u *tablici 2.7.* i na *slici 2.23.*

Tablica 2.7. Rasponi prosječnih visina neravnina, Rz5 [20]

Klasa	Prosječna visina neravnina, Rz5, μm
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,2a mm)



Slika 2.22. Tolerancija okomitosti ili kutnosti, u – debljine radnog komada do 30 mm [20]



Slika 2.23. Prosječna visina neravnina, Rz5 – debljine radnog komada do 30 mm [20]

3. Eksperimentalni dio

Cilj eksperimentalnog dijela diplomskog rada je za određene vrste materijala (nelegirani čelik, visokolegirani Cr-Ni čelik i Al – legura) i njihove debljine odrediti optimalne parametre rezanja te je potrebno usporediti utjecaj plazmenog plina na kvalitetu reza i brzinu rezanja. Kvalitetu rezne površine, odnosno značajke kvalitete reza je potrebno ispitati u skladu s normom HRN EN ISO 9013. Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

3.1. Oprema za rezanje

Sustav za plazma rezanje prikazan je *slikom 3.1.*, a smješten je u Laboratoriju za zavarivanje na FSB – u, u Zagrebu.



Slika 3.1. Prikaz CNC stola i upravljačke jedinice za plazma rezanje

Vođenje plazma pištolja izvodi troosni pozicijski CNC sustav – stol, PROXIMA KOMPAKT 10/20 proizvođača VANAD. PROXIMA KOMPAKT 10/20 je portalna rezačica s dvostranim sinkroniziranim pogonom, s tri pogonska servo motora.

Dvostrani sinkronizirani pogon omogućava visoku točnost rezanja, dulji vijek trajanja i vrlo malo odstupanje od idealne geometrije rezanja. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 20 m/min. Radno područje stola iznosi 1050 x 2200 mm. Rezolucija iznosi 0,01 mm, a točnost ponavljanja i pozicioniranja iznosi +/- 0,05 mm. Za izvođenje vertikalnog gibanja brzinom do 8 m/min, postoje dvije Z osi, jedna za lasersku glavu, a druga za plazma pištolj. Svaka Z os opremljena je senzorikom za automatsko održavanje udaljenosti između sapnice i lima, s točnošću +/- 0,15 mm. S donje strane stola nalazi se segmentni odsis plinova pomoću filterskog sustava IPERJET, *slika 3.2.*

Velikim brzinama i izvrsnim dinamičkim karakteristikama stola upravlja kontrolni CNC sustav VANAD – MEFI. To je dvostruki 867 upravljački sustav s dva Intel procesora i zajedničkom sabirnicom. Kontrolni sustav osigurava optimalne tehničke parametre, kao i visoku točnost, preciznost i dinamiku prilikom promjene smjera ili brzine rezanja. Navedeni kontroler namjenjen je za upravljanje i kontrolu laserskih rezačica, a može se koristiti i kod visokopreciznih plazma rezačica. Visoka produktivnost rezanja podržana je značajno reduciranim vremenom podizanja obradne glave te ubrzanim namještanjem početne visine bušenja (probijanja) što povećava produktivnost približno 30% u odnosu na klasične tipove upravljanja plazma pištoljem. Posebno je važno upravljanje na početku i kraju rezanja, posebno kod unutarnjih kontura te upravljanje gibanjem po kutevima. Prihvat plazma pištolja i laserske glave izveden je sa zaštitom od kolizije kako ne bi došlo do oštećenja u slučaju udara u radni komad [9].

Za rezanje plazmom koristi se izvor za visokoprecizna toplinska rezanja, SPARCIN 900M, proizvođača SPT Plasmatechnik AB (*slika 3.2.*). Metali debljine od 1 do 20 mm mogu se rezati sa strujama od 20 do 120 A s intermitencijom 100%. Tanki limovi do 8 mm debljine mogu se rezati vrlo precizno u "high definition" klasi, dok je maksimalna debljina rezanja 28 mm. Plazma sustav koristi tehničke plinove kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine, što daje optimalne rezultate rezanja kod svih vrsta metala. Također je moguće koristiti i zrak. Izvor je konstruiran s inverterskom tehnologijom i ima odlične mogućnosti integriranja s robotiziranim i vrhunskim CNC sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza. *Tablica 3.1.* prikazuje tehničke podatke izvora za plazma rezanje SPARCIN 900M.



Slika 3.2. Prikaz odsisnog sustava i izvora za plazma rezanje

Tablica 3.1. Tehnički podaci izvora za plazma rezanje SPARCIN 900M [21]

Tehnički podaci	SPARCIN 900M
Napajanje	3~50 Hz; 400 V
Osigurač	16 A spori
Nazivna snaga	12 kVA
Raspon regulacije struje rezanja	120 V; 20 – 120 A
Intermitencija	100%
Napon praznog hoda	200 V
Klasa zaštite	IP 22
Hlađenje	Voda
Klasa izolacije	F
Dimenzije DxŠxV	550x360x920
Masa	47 kg

3.2. Radni materijali

Nelegirani čelik

Čelik korišten u eksperimentu je oznake S235JRG1 i spada u skupinu općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije. Od svih čelika, opći konstrukcijski čelici su najzastupljeniji u proizvodnji (65 – 80 % mase) pa i u primjeni za niz nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase, kao što su npr. mostovi, dizalice, nosači, brodske konstrukcije, dijelovi vozila, oprema u industriji nafte i plina, a neki i za tipične strojne elemente [22].

Od tehnoloških svojstava naročito je važna zavarljivost, dok od ostalih traženih svojstava treba spomenuti hladnu oblikovljivost, prikladnost za savijanje, duboko vučenje, kovanje i sl. i rezljivost.

To su nelegirani čelici s feritno – perlitnom mikrostrukturom. Zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja normaliziran. Sitnozrnatost se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji stvara aluminijev nitrid (AlN) i sprječava rast zrna pri kasnijim zagrijavanjima [22].

Kemijski sastav i mehanička svojstva ovog čelika dani su u *tablicama 3.2. i 3.3.*

Tablica 3.2. Kemijski sastav čelika S235JRG1 [23]

Oznaka čelika	Kemijski sastav, [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Drugi
S235JRG1	≤0,17	-	≤1,40	≤0,045	≤0,045	-	-	-	N≤0,007

Tablica 3.3. Mehanička svojstva čelika S235JRG1 [22]

Oznaka čelika	R_m , N/mm ² za debljinu u mm		R_{eH} , N/mm ² za debljinu u mm		A_5 , [%]
	≤3	3 – 100	≤16	16 – 40	min
S235JRG1	360 – 510	340 – 470	235	225	21

Nehrđajući čelik

Nehrđajući čelik korišten u eksperimentu je oznake X5CrNiMo17-12-2 (EN – standard)/316 (ASTM – standard), po svojoj mikrostrukturi spada u grupu austenitnih čelika. Austenitni nehrđajući čelici prema broju legura koje spadaju u ovu skupinu i obimu korištenja čine najveću skupinu nehrđajućih čelika. Austenitni čelici obuhvaćaju 70% primjene nehrđajućih čelika u industriji. Razlog tome je kombinacija izvrsne korozijske postojanosti, zavarljivosti, mehaničkih svojstava, obradljivosti te estetskih karakteristika. Ove legure imaju dobra svojstva i na povišenim i na sniženim temperaturama. Jedan od nedostataka austenitnih čelika je niska vrijednost granice razvlačenja. Austenitni su čelici otporni i na djelovanje oksidirajućih i na djelovanje reducirajućih medija čemu najviše doprinosi sadržaj nikla. Iako u cjelini znatno otporniji na korozijsko djelovanje, austenitni se čelici odabiru tek ukoliko jeftiniji feritni ne zadovoljavaju. Tek će u vrlo malome broju slučajeva feritni čelici biti u prednosti pred austenitnim: to je prije svega znatno veća otpornost feritnih čelika na napetosnu koroziju te u slučaju djelovanja plinova izgaranja sa sadržajem sumpora [24].

Neka od svojstava austenitnih čelika jesu [22]:

- nemagnetični zbog austenitne strukture,
- dobro oblikovljivi u hladnom stanju (visoka A_5 , Z i KU , a niska R_e i R_m), a hladnom deformacijom mogu očvrnuti,
- uz dodatno legiranje s Mo, Ti i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama > 600 °C,
- zbog zadovoljavajuće žilavosti pri sniženim temperaturama primjenjuju se teorijski do -273 °C,
- otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli,
- u određenim su uvjetima podložni interkristalnoj koroziji.

Austenitni čelici kojima je snižen maseni udio ugljika ($< 0,03$ %) prema američkim ASTM normama nose dodatnu oznaku L, LC ili ELC. Snižanjem udjela ugljika postiže se povećana otpornost na pojavu interkristalne korozije (manja mogućnost stvaranja Cr – karbida), ali je još snižena čvrstoća i otpornost na puzanje. Svojstva zavarljivosti i oblikovljivosti su bitno bolja nego kod klasičnih austenitnih čelika.

Kemijski sastav i mehanička svojstva ovog čelika dani su u *tablicama 3.4. i 3.5.*

Tablica 3.4. Kemijski sastav čelika X5CrNiMo17-12-2 [23]

Oznaka čelika	Kemijski sastav, [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Drugi
X5CrNiMo17-12-2	≤0,070	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	16,5-18,5	2-2,50	10-13,0	N≤0,11

Tablica 3.5. Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2 [23]

Oznaka čelika	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₅ [%]	Z [%]	KV [J]	Tvrdoća [HRC]	Tvrdoća [HB]
X5CrNiMo17-12-2	205	515	40	-	-	95	217

Al – legura

Legura aluminija korištena u eksperimentu je oznake AlMg3 te spada u skupinu lijevanih legura aluminija. Osnovna svojstva lijevanih Al-Mg legura prikazana su u *tablici 3.6.*

Tablica 3.6. Osnovna svojstva lijevanih Al-Mg legura [22]

Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik
mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg	AlMg3, AlMg5

Glavna značajka Al-Mg legura je dobra korozijska postojanost. Neke od Al-Mg legura su otporne na udarce pa se mogu koristiti za umjereno opterećene dijelove u pomorstvu. Najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti ima legura s 10% Mg. Nažalost, ona je jedna od teže livljivih legura zbog pojava poroznosti, stvaranja troske i loše žitkosti. Zbog toga su u uporabi najviše legure s 3 i 5% Mg. Al-Mg legure se dobro zavaruju, imaju visoka mehanička svojstva pri niskim temperaturama te se koriste u građevinarstvu, brodogradnji, uređajima za desalinizaciju morske vode, za izradbu cisterni, itd. [22, 25].

Kemijski sastav i mehanička svojstva ove aluminijske legure dani su u *tablicama 3.7. i 3.8.*

Tablica 3.7. Kemijski sastav Al – legure AlMg3 [25]

Oznaka legure	Kemijski sastav, [%]								
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Drugi	Ostatak
AlMg3	≤0,15	3,5-4,5	≤0,35	≤0,35	≤0,50	≤0,15	≤0,25	≤0,15	Al

Tablica 3.8. Mehanička svojstva Al – legure AlMg3 [25]

Oznaka legure	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	Tvrdoća [HB]
AlMg3	95	145	50

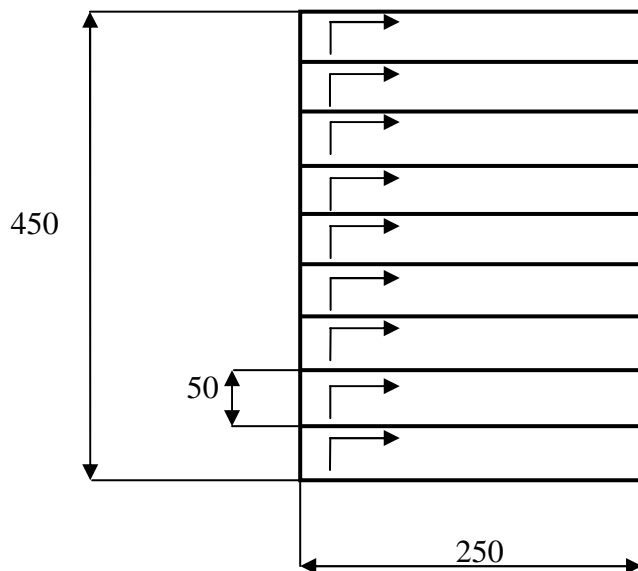
3.3. Plan pokusa

U cilju određivanja optimalnih parametara rezanja za odabrane radne materijale i debljine, te određivanja utjecaja plazmenog plina na kvalitetu i brzinu rezanja odlučeno je da će se u eksperimentu varirati utjecajni čimbenici rezanja, tako da se za svaku debljinu i vrstu materijala (3) ostvari 18 rezova, odnosno 9 rezova po izabranom plazmenom plinu (dvije vrste plina za svaki materijal). Brzina rezanja će se mijenjati s korakom od 0,5 m/min, od 1 do 5 m/min (*tablica 3.9.*). Svi ostali parametri će se držati konstantnima.

Tablica 3.9. Plan pokusa

Broj pokusa		Materijal	Debljina materijala (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Vrsta plazmenog plina	
1.	10.	Nelegirani čelik	5	1	Zrak	Kisik (O ₂)
2.	11.			1,5		
3.	12.			2		
4.	13.			2,5		
5.	14.			3		
6.	15.			3,5		
7.	16.			4		
8.	17.			4,5		
9.	18.			5		
1.	10.	Nehrdajući čelik	5	1	Zrak	Dušik (N ₂)
2.	11.			1,5		
3.	12.			2		
4.	13.			2,5		
5.	14.			3		
6.	15.			3,5		
7.	16.			4		
8.	17.			4,5		
9.	18.			5		
1.	10.	Al-legura	4	1	Zrak	Ar/H ₂ (65/35)
2.	11.			1,5		
3.	12.			2		
4.	13.			2,5		
5.	14.			3		
6.	15.			3,5		
7.	16.			4		
8.	17.			4,5		
9.	18.			5		

Rezanje će se izvršiti na obje debljine materijala (5 mm za nelegirani i nehrđajući čelik te 4 mm za Al – leguru) prema planu pokusa. Uzorci dimenzija 250x50 biti će izrezani u obliku češlja s razmakom između rezova od 50 mm. *Slika 3.3.* prikazuje dimenzije uzoraka te smjer napredovanja rezanja. Dimenzije uzoraka birane su s ciljem njihovog daljnjeg korištenja za istraživanja, što također pokazuje da je rezanje samo prva u nizu tehnoloških operacija te da uzorak nakon rezanja treba biti spreman za slijedeću tehnologiju (npr. zavarivanje). Nakon izrade češlja obaviti će se odrezivanje uzoraka te će se pristupiti određivanju kvalitete reza. Od značajki kvalitete reza ispitivati će se hrapavost površine te tolerancija okomitosti ili kutnosti.

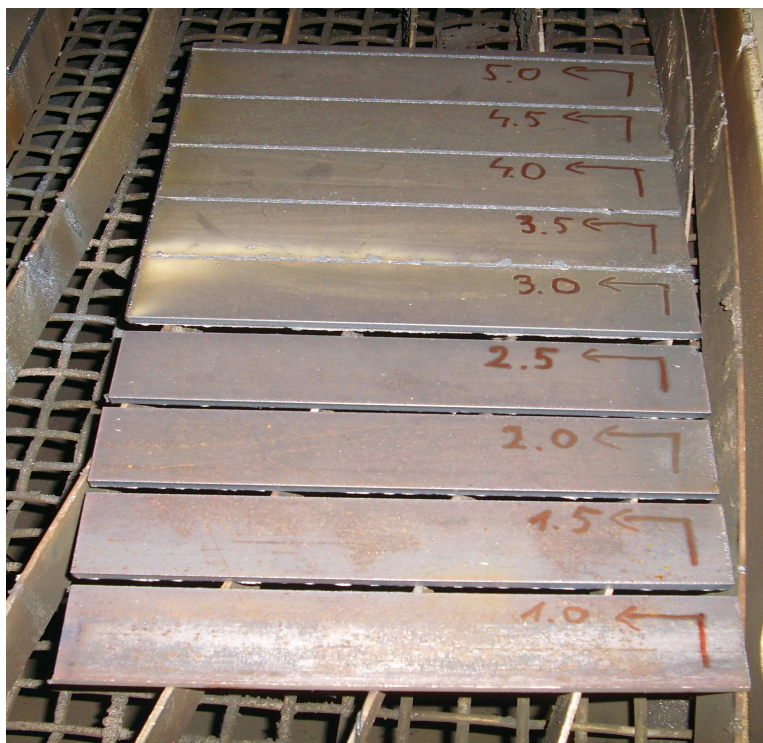


Slika 3.3. Skica rezanja

3.4. Plazma rezanje nelegiranog čelika S235JRG1

3.4.1. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

Uzorci su izrezani u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a prema planu pokusa, različitim brzinama rezanja kako bi se vidio utjecaj brzine rezanja i plazmenog plina na samu kvalitetu površine reza. Ostali parametri procesa rezanja su držani konstantnima. *Tablica 3.10.* prikazuje parametre rezanja nelegiranog čelika s zrakom kao plazmenim plinom.



Slika 3.4. Uzorci nelegiranog čelika nakon rezanja – plazmeni plin zrak

Nakon izvršenog plana pokusa rezanja nelegiranog čelika s zrakom kao plazmenim plinom, vidi se da nije pri svim brzinama rezanja došlo do potpunog rezanja materijala (*slika 3.4.*). Brzinama rezanja od 3 do 5 m/min nije došlo do rezanja materijala, već se kao posljedica prevelike brzine rezanja stvarao srh na gornjoj površini materijala. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja nelegiranog čelika dolaze u obzir samo brzine pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala te su površine reza tih uzoraka ispitane i klasificirane u skladu s normom HRN EN ISO 9013.

Tablica 3.10. Parametri rezanja nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Zrak	0,9	1	2	70	3
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

U tablici 3.11. prikazane su površine reza uspješno izrezanih uzoraka i to u smjeru napredovanja rezanja. Prikaz je dat kako bi se i prije ispitivanja značajki kvalitete rezanja vidio utjecaj promjene brzine rezanja na dobivenu površinu reza. Na slikama se može uočiti da je pri svim brzinama rezanja došlo do nejednolikih rezova i stvaranja srha na nekim dijelovima donje površine reza, što govori o potrebi naknadne obrade skidanja srha prije eventualno slijedeće tehnološke operacije (npr. zavarivanja). S povećanjem brzine rezanja dobijao se bolji izgled površine reza i vertikalnije linije rezanja, odnosno bolja kvaliteta reza. Isto tako se vidi da je granična brzina poboljšanja kvalitete površine reza 2,5 m/min te da je pri toj brzini došlo do stvaranja brazda u obliku slova S (povećanje hrapavosti površine), što je posljedica većih brzina rezanja. Uostalom, iznad brzine 2,5 m/min rezanje nije niti bilo izvedivo.

Tablica 3.11. Izgled površina reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

Smjer rezanja		Slike uzoraka nakon rezanja	
Uzorak	v (m/min)	—————▶	
		Konstantni parametri: plin – zrak, promjer sapnice – 0,9 mm, udaljenost sapnice od lima – 2 mm, struja rezanja – 70 A, tlak plina – 3 bar.	
1.	1		
2.	1,5		
3.	2		
4.	2,5		

3.4.2. Mjerenje hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

Tehničke površine nisu idealno glatke geometrijske plohe koje razdvajaju dva medija, već su to, mikroskopski gledano, hrapave plohe karakterizirane nizom neravnina različitih veličina, oblika i rasporeda. Veličina hrapavosti može utjecati na:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti (odnosno, smanjenje čvrstoće oblika),
- pojačano trenje i habanje tribološki opterećenih površina,
- ubrzavanje korozije [26].

Osim R_z – prosječna visina neravnina, koja je definirana u navedenoj normi HRN EN ISO 9013, pomoću uređaja za ispitivanje hrapavosti površine (*slika 3.5.*) izmjerene su i slijedeće veličine:

- R_{max} – najveća visina profila hrapavosti,
- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti,
- R_p – najveća visina ispupčenja profila hrapavosti,
- W – srednja dubina valovitosti.

Hrapavost površine se mjerila u smjeru napredovanja reza, a uzimalo se u obzir prvih 100 mm površine reza. Sva mjerenja hrapavosti površine izvršena su u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina Fakulteta strojarstva i brodogradnje (LFSB), pomoću uređaja za ispitivanje hrapavosti površine. Izvršena su mjerenja na tri mjesta površine reza te su određene srednje vrijednosti navedenih veličina hrapavosti površine, standardne devijacije, rasponi te minimumi i maksimumi izmjerenih veličina (*tablica 3.12.*). Mjerenje je izvršeno na uzorcima kod kojih je došlo do potpunog rezanja, odnosno odvajanja materijala.



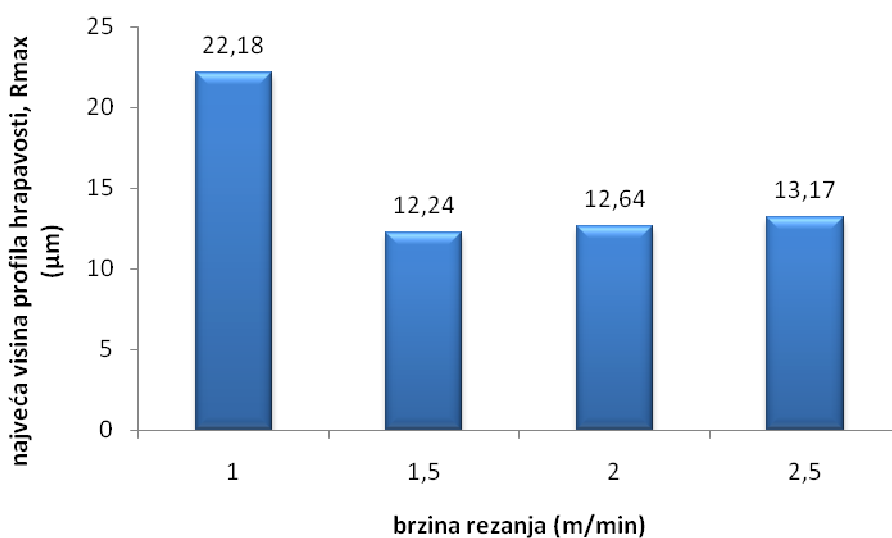
Slika 3.5. Prikaz uređaja za ispitivanje hrapavosti površine

Tablica 3.12. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

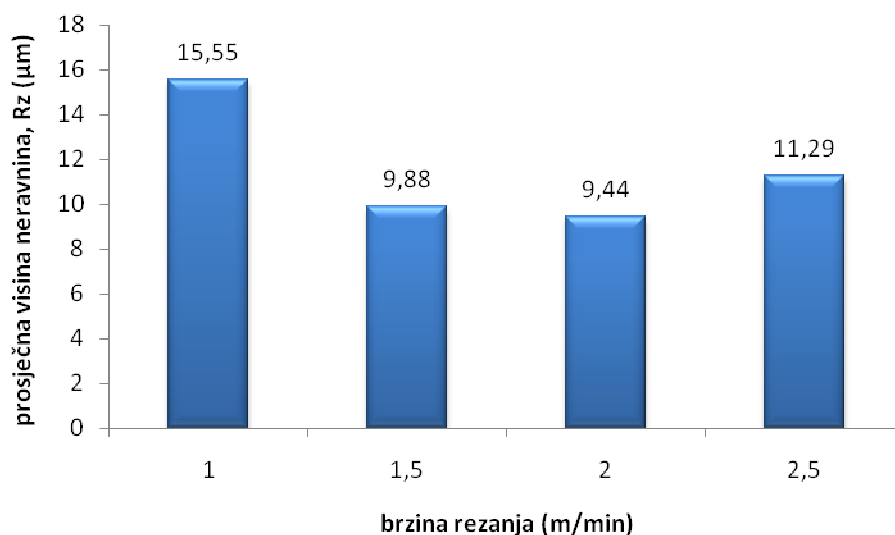
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 1 (brzina rezanja= 1 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	22,18	2,19	4,08	23,76	19,68
R_z	15,55	1,72	3,45	17,28	13,83
R_a	2,67	0,17	0,34	2,85	2,51
R_p	13,30	2,92	5,84	16,25	10,41
W	11,40	3,02	5,73	14,82	9,09
Uzorak 2 (brzina rezanja= 1,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	12,24	1,24	2,39	13,63	11,24
R_z	9,88	0,80	1,54	10,53	8,99
R_a	1,78	0,12	0,21	1,85	1,64
R_p	7,30	1,17	2,34	8,42	6,07
W	11,66	3,14	5,84	15,24	9,40
Uzorak 3 (brzina rezanja= 2 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	12,64	2,28	4,43	14,53	10,11
R_z	9,44	0,49	0,97	9,88	8,91
R_a	1,57	0,14	0,27	1,69	1,41
R_p	6,23	0,25	0,49	6,52	6,03
W	8,30	3,75	7,42	11,67	4,25
Uzorak 4 (brzina rezanja= 2,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	13,17	2,05	3,66	15,53	11,87
R_z	11,29	2,06	3,75	13,66	9,91
R_a	1,93	0,22	0,43	2,18	1,75
R_p	7,45	1,50	2,66	9,18	6,52
W	12,65	3,89	7,57	15,92	8,35

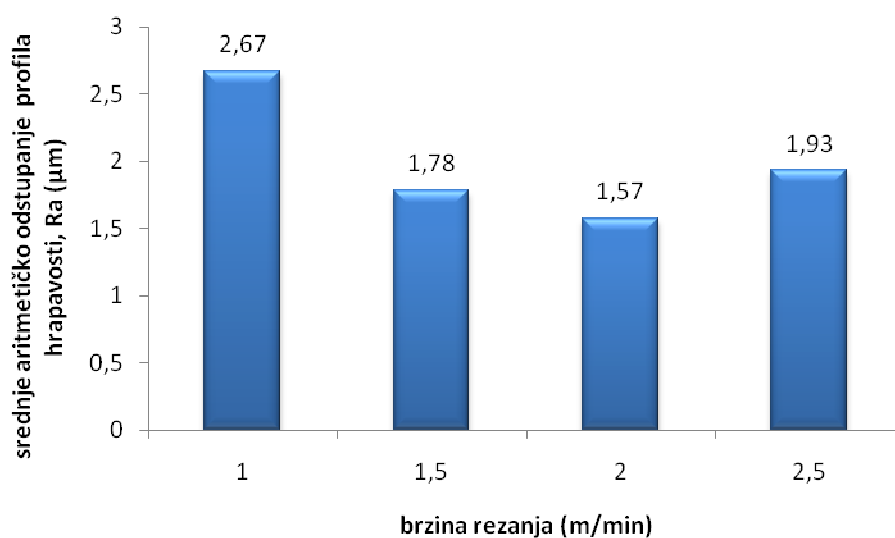
Prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – Rz. Iz datih rezultata prosječnih visina neravnina uzoraka, vidljivo je da su se rezanjem postigle jako dobre klase kvalitete hrapavosti površine. Svi ispitivani uzorci, osim uzorka 1 ($v = 1\text{ m/min}$) spadaju u prvu klasu ili područje hrapavosti, dok spomenuti uzorak spada u klasu niže (druga klasa ili područje hrapavosti). Što se tiče svih veličina hrapavosti površine, osim veličine R_{\max} , najmanja hrapavost dobijena je na trećem uzorku s brzinom rezanja od 2 m/min. Na slikama 3.6. do 3.10., prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti ispitivanih uzoraka te njihova promjena u ovisnosti o brzini rezanja.



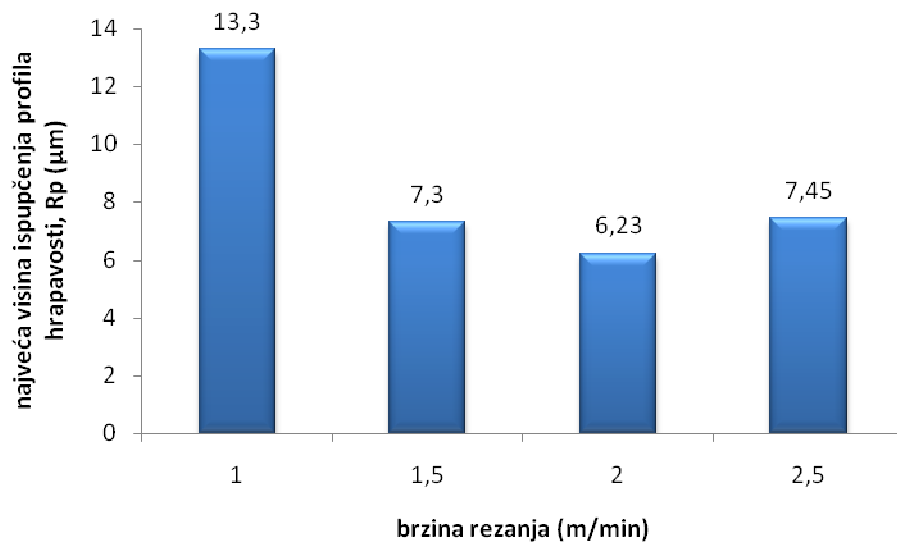
Slika 3.6. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak



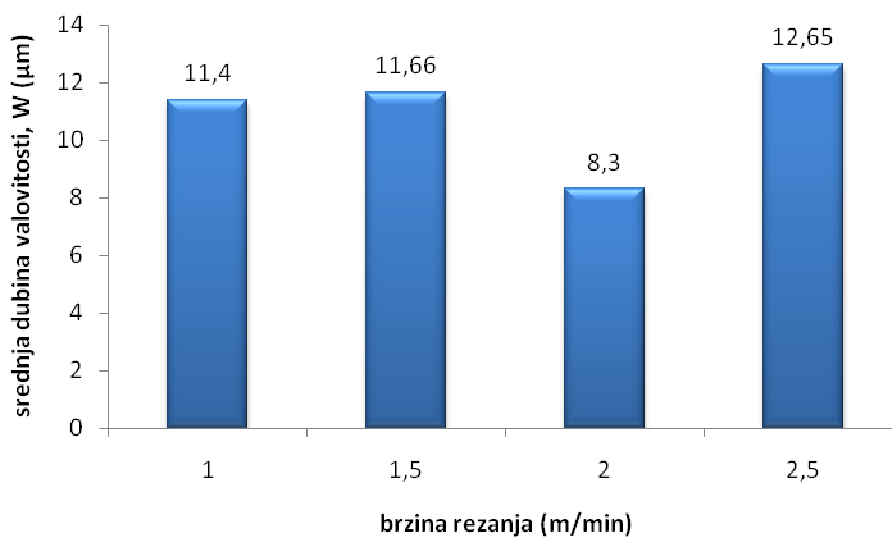
Slika 3.7. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.8. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.9. Prikaz ovisnosti najveće visine ispućenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.10. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak

3.4.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nelegiranog čelika – plazmeni plin zrak

Druga važna značajka kvalitete reza je nagib (kut površine reza). Ako je nagib reza od gornje do donje površine radnog materijala točno pod 90° , tad je nagib reza jednak nuli. Udaljenost sapnice može znatno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači i manji nagib reza. Mjerenje je izvršeno uz pomoć kutomjera (slika 3.11.), koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB). Mjerio se kut između gornje i donje površine reza (α) te se dobivena vrijednost oduzimala od pravog kuta, kako bi se dobilo stvarno odstupanje uzorka od okomitosti ili kutnosti. Zatim se uz pomoć formule za duljinu kružnog luka ($l = 2r\pi\alpha/360^\circ$) preračunavala vrijednost kuta u duljinu, kako bi se tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirala prema normi HRN EN ISO 9013.



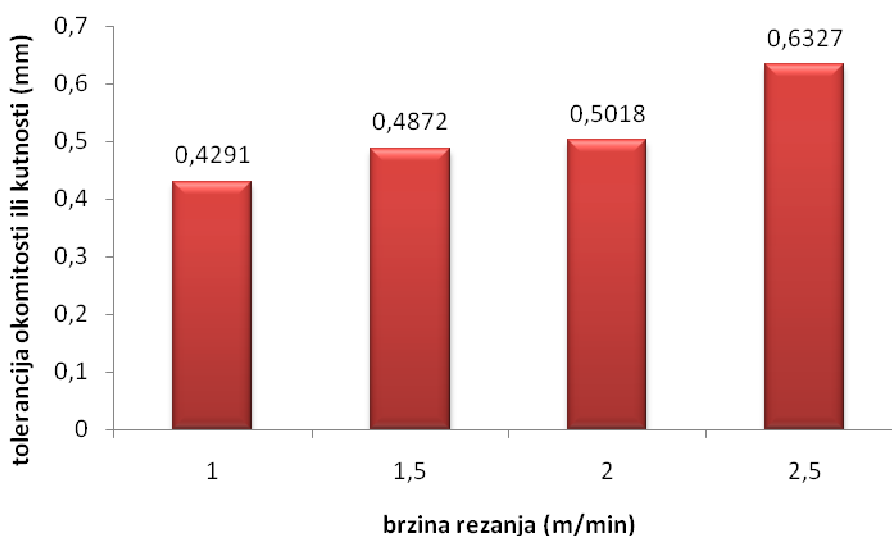
Slika 3.11. Kutomjer korišten za mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti

Mjerenje tolerancija okomitosti ili kutnosti izvršeno je na svim uzorcima do kojih je došlo do potpune penetracije plazme kroz materijal, odnosno na uzorcima izrezanim brzinama rezanja od 1 do 2,5 m/min. Dobiveni rezultati tolerancija prikazani su u tablici 3.13.

Tablica 3.13. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti ($^\circ$)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
1.	1	$9^\circ 50'$	0,4291
2.	1,5	$11^\circ 10'$	0,4872
3.	2	$11^\circ 30'$	0,5018
4.	2,5	$14^\circ 30'$	0,6327

Nakon mjerenja i dobivenih rezultata, tolerancije okomitosti ili kutnosti treba svrstati u određenu klasu prema normi HRN EN ISO 9013. Iz samih rezultata se vidi da su dobijene veće razlike u kutnosti između mjerenih uzoraka, odnosno promjena brzine rezanja je utjecala na mijenjanje mjerene veličine. Prema *tablici 2.6* i *slici 2.22* u kojima se nalaze rasponi odstupanja kutnosti ili okomitosti određene su klase kvalitete rezanja. Svi uzorci osim uzorka 1 spadaju u četvrtu klasu odstupanja od okomitosti ili kutnosti. Spomenuti uzorak, izrezan brzinom rezanja 1 m/min spada u treću klasu odstupanja mjerene vrijednosti. Prikaz mijenjanja tolerancije okomitosti ili kutnosti s brzinom rezanja dat je na *slici 3.12*. te se vidi da se s povećanjem brzine rezanja povećavalo i odstupanje od okomitosti.



Slika 3.12. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin zrak

3.4.4. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

I ovi uzorci nelegiranog čelika su prema planu pokusa izrezani u Laboratoriju za zavarivanje, s istim brzinama rezanja, samo s različitim plazmenim plinom, u ovom slučaju kisikom. Prikaz plazma rezanja nelegiranog čelika prikazan je na *slici 3.13*. Ostali parametri procesa su držani konstantnima. *Tablica 3.14*. prikazuje parametre rezanja nelegiranog čelika.



Slika 3.13. Plazma rezanje nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

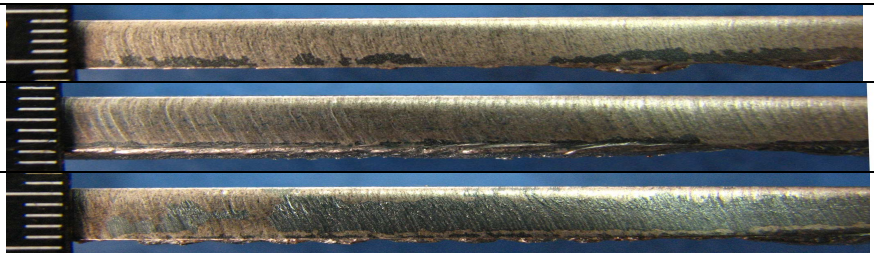
Pri izradi ovog eksperimentalnog dijela diplomskog rada također se nisu dobili uspješni rezovi pri svim brzinama rezanja. Potpuno rezanje se postiglo samo pri brzinama rezanja od 1 do 2 m/min, dok pri ostalim brzinama nije došlo do penetracije plazme kroz materijal, odnosno do ispuhivanja taline metala. Tako je ispitivanje značajki kvalitete rezanja i odabir optimalnih parametara za ovakove uvjete rezanja bilo usredotočeno na tri uzorka (brzine rezanja 1, 1,5 i 2 m/min).

U *tablici 3.15*. dat je prikaz površina reza uspješno izrezanih uzoraka nelegiranog čelika. Na slikama se uočava da je pri rezanju dolazilo do stvaranja srha na donjoj površini reza te je vidljiva prisutnost pojave oksida. Izuzev spomenutih greški, rezanjem su dobijene glatke površine reza. Na tim površinama reza su ispitane značajke kvalitete rezanja, hrapavost površine i odstupanje od kutnosti.

Tablica 3.14. Parametri rezanja nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Kisik	0,9	1	2	70	3
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

Tablica 3.15. Izgled površina reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

Smjer rezanja		Slike uzoraka nakon rezanja
Uzorak	v (m/min)	Konstantni parametri: plin – kisik, promjer sapnice – 0,9 mm, udaljenost sapnice od lima – 2 mm, struja rezanja – 70 A, tlak plina – 3 bar.
1.	1	
2.	1,5	
3.	2	

3.4.5. Mjerenje hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

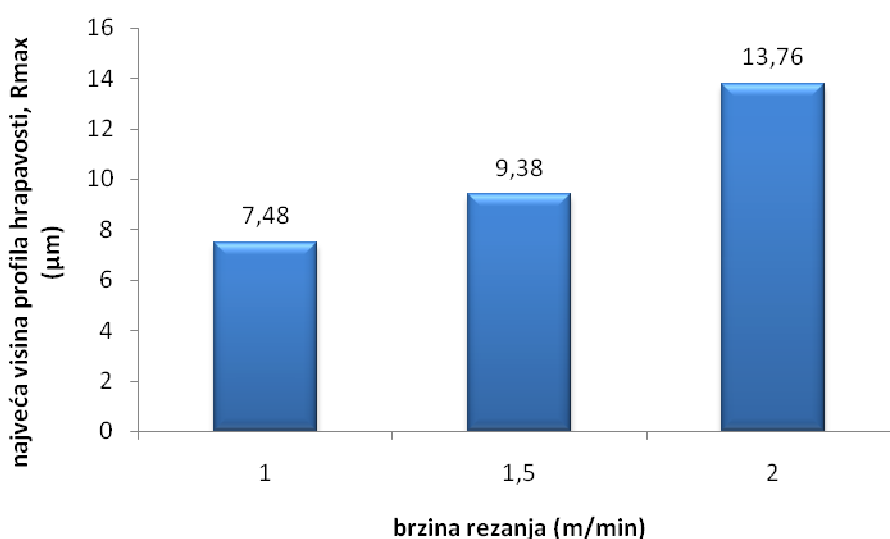
Mjerenje je izvršeno u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine, perthometer S8P. Izvršena su mjerenja na tri mjesta površine reza te su se uz pomoć uređaja dobile srednje vrijednosti veličina hrapavosti površine, standardne devijacije, rasponi te samim time minimumi i maksimumi izmjerenih veličina. Dobivene vrijednosti veličina hrapavosti prikazani su u *tablici 3.16.* .

Tablica 3.16. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

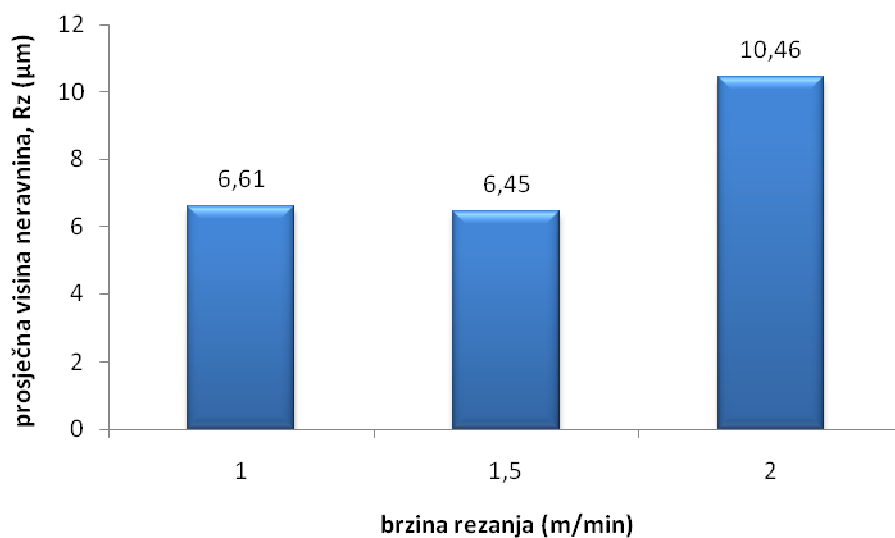
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 1 (brzina rezanja= 1 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	7,48	1,25	2,48	8,81	6,33
R_z	6,61	0,67	1,34	7,29	5,95
R_a	1,17	0,17	0,34	1,34	0,99
R_p	4,20	0,48	0,95	4,73	3,78
W	7,43	0,22	0,39	7,68	7,29
Uzorak 2 (brzina rezanja= 1,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	9,38	3,77	7,53	13,11	5,58
R_z	6,45	1,77	3,49	8,37	4,88
R_a	1,22	0,35	0,66	1,60	0,94
R_p	5,32	2,77	5,53	8,14	2,61
W	9,15	0,72	1,40	9,77	8,36
Uzorak 3 (brzina rezanja= 2 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	13,76	3,52	6,13	17,82	11,70
R_z	10,46	3,04	6,03	13,71	7,68
R_a	1,75	0,73	1,30	2,59	1,28
R_p	6,17	2,21	3,87	8,72	4,85
W	17,66	5,32	10,07	23,69	13,62

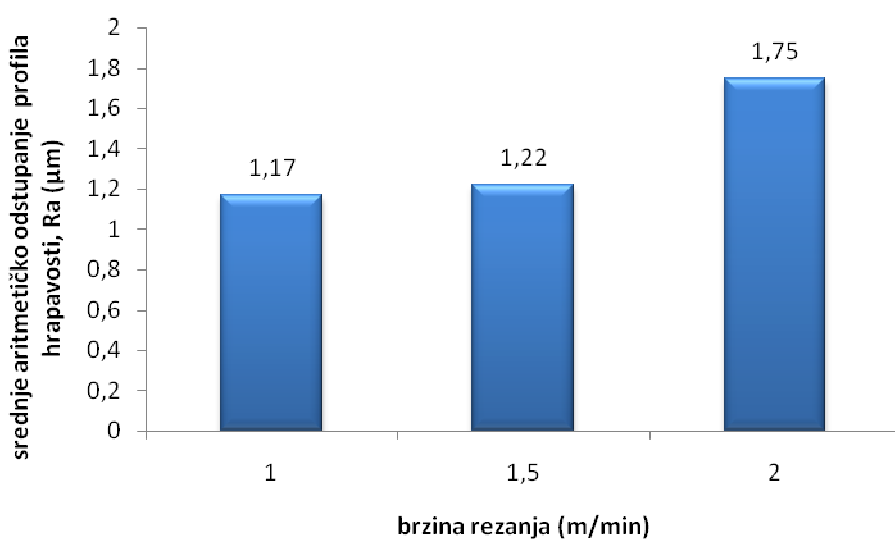
Prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – Rz. Prema *tablici 2.7. i slici 2.23.* određena je klasa hrapavosti pojedinih uzoraka. Pri rezanju nelegiranog čelika i upotrebi kisika kao plazmenog plina, dobijena je odlična klasa hrapavosti površine, odnosno svi ispitivani uzorci spadaju u prvu klasu ili područje hrapavosti površine. S time da je na drugom uzorku ($v=1,5$ m/min) dobijena najmanja (najbolja) vrijednost prosječne visine neravnina, u iznosu od $6,45 \mu\text{m}$. Na *slikama 3.14. do 3.18.* prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti ispitivanih uzoraka te njihovo mijenjanje u ovisnosti o brzini rezanja.



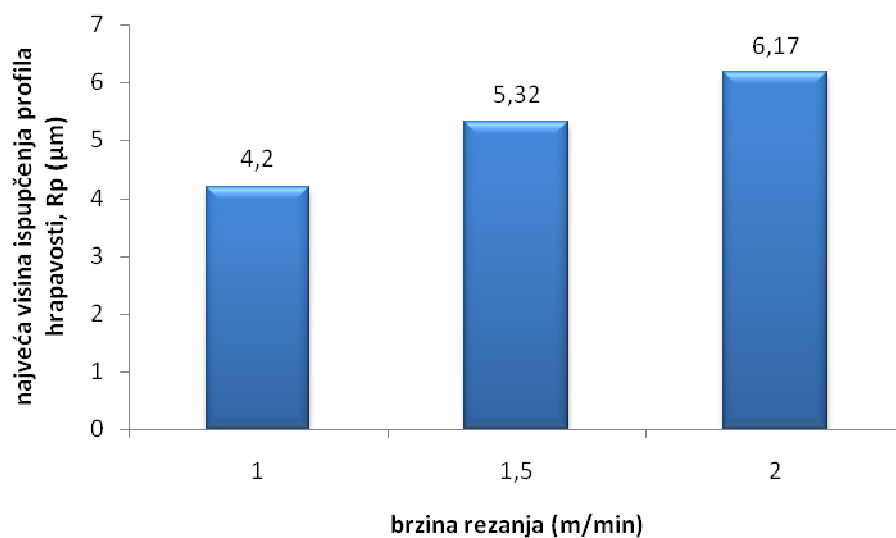
Slika 3.14. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik



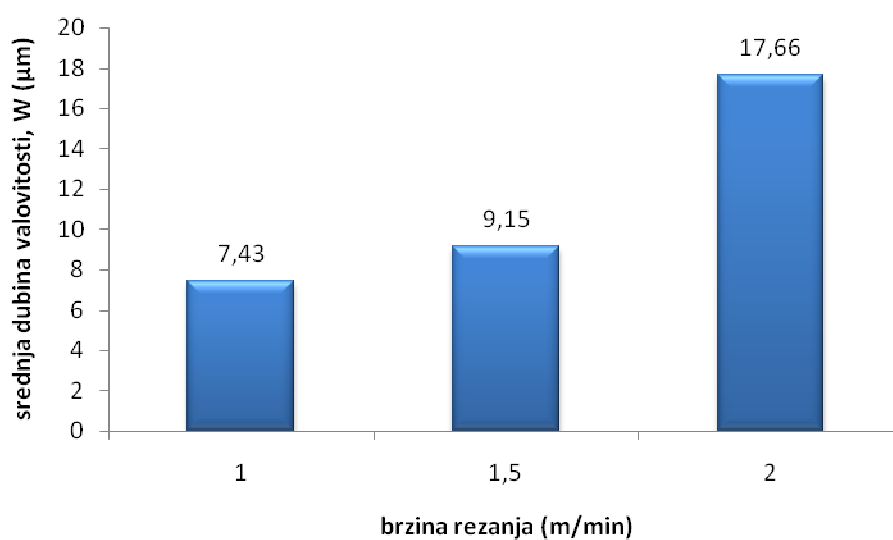
Slika 3.15. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik



Slika 3.16. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik



Slika 3.17. Prikaz ovisnosti najveće visine ispuččenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik



Slika 3.18. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik

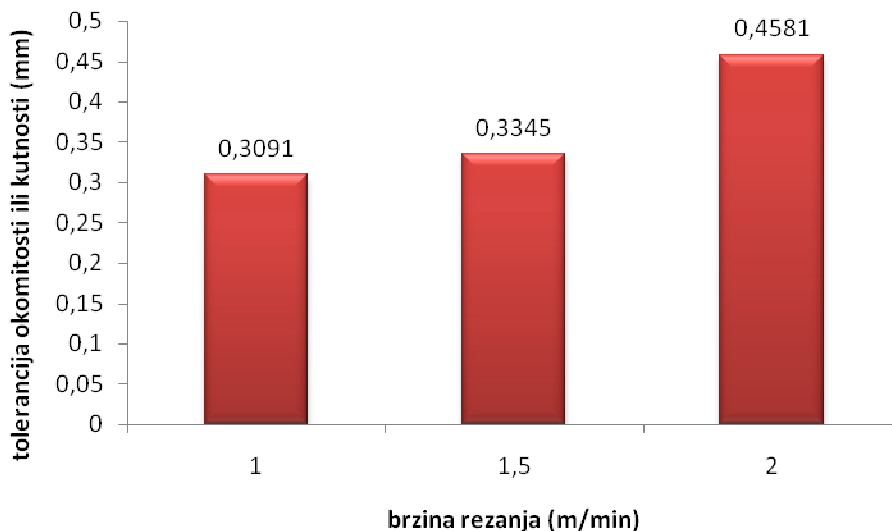
3.4.6. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nelegiranog čelika – plazmeni plin kisik

Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti izvršeno je na tri uspješno izrezana uzorka pri korištenju kisika kao plazmenog plina. Mjerenja su izvršena na isti način kao i u prethodnom primjeru, gdje se dobivena vrijednost kuta oduzimala od pravog kuta te preračunavala u jedinicu duljine. Dobiveni rezultati odstupanja od kutnosti prikazani su u *tablici 3.17*.

Tablica 3.17. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (°)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
1.	1	7°05'	0,3091
2.	1,5	7°40'	0,3345
3.	2	10°30'	0,4581

Nadalje, dobivene vrijednosti odstupanja svrstane su u klase odstupanja prema normi HRN EN ISO 9013. Dobijeni su bolji rezultati, odnosno manja odstupanja u odnosu na rezanje nelegiranog čelika s zrakom kao plazmenim plinom. I u ovom slučaju odstupanja su se povećavala s brzinom rezanja. Prema *tablici 2.6* i *slici 2.22* u kojima se nalaze rasponi odstupanja kutnosti ili okomitosti određene su klase kvalitete rezanja. Uzorci 1 i 2 spadaju u treću klasu odstupanja od okomitosti ili kutnosti, dok uzorak izrezan brzinom rezanja 2 m/min spada u četvrtu klasu odstupanja. Prikaz mijenjanja tolerancije okomitosti ili kutnosti s brzinom rezanja dat je na *slici 3.19*.





Slika 3.19. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nelegirani čelik – plazmeni plin kisik

3.4.7. Usporedba kvalitete rezanja nelegiranog čelika

Nakon svih izvršenih ispitivanja, u *tablici 3.18.* prikazana je usporedba kvalitete reza nelegiranog čelika debljine 5 mm s zrakom i kisikom kao plazmenim plinovima i to uzoraka izrezanih s optimalnim parametrima pojedinog plazmenog plina. Iz dobivenih rezultata eksperimentalnog dijela rada vidljivo je da su uzorci s najboljom kvalitetom rezanja izrezani približno istom brzinom (razlika u koraku od 0,5 m/min). S upotrebom oba plazmena plina se dobila glatka površina reza te mala hrapavost površine o čemu govori i klasificirana prosječna visina neravnina Rz prema normi HRN EN ISO 9013, gdje su oba reza pripali prvoj klasi ili području hrapavosti površine. Druga mjerena značajka kvalitete rezanja, tolerancija okomitosti ili kutnosti pokazala je veća odstupanja u odnosu na hrapavost površine. Plazma rezanje s optimalnom brzinom od 2 m/min i zrakom kao plazmenim plinom ostvarilo je četvrtu klasu odstupanja od okomitosti ili kutnosti, dok je plazma rezanje s optimalnom brzinom od 1,5 m/min i kisikom kao plazmenim plinom ostvarilo treću klasu odstupanja od okomitosti ili kutnosti.

Tablica 3.18. Usporedba kvalitete rezanja nelegiranog čelika

Plazmeni plin	Zrak	Kisik
		
v (m/min)	2	1,5
Hrapavost površine (µm)		
Rmax	12,64	9,38
Rz	9,44	6,45
Ra	1,57	1,22
Rp	6,23	5,32
W	8,30	9,15
Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)		
u	0,5018	0,3345

Pri plazma rezanju nelegiranog čelika upotreba kisika kao plazmenog plina se pokazala boljom u odnosu na kombinaciju s zrakom. Sve mjerene veličine hrapavosti, osim srednje dubine valovitosti su pokazale bolje rezultate s upotrebom kisika kao plazmenog plina. Iako je s oba plazmena plina dobivena prva klasa hrapavosti površine (Rz), veličina prosječne visine neravnina je za trećinu manja s korištenjem kisika u odnosu na zrak pri plazma rezanju nelegiranog čelika. Isto tako, kad je u pitanju i druga mjerena značajka kvalitete rezanja, tolerancija okomitosti ili kutnosti, plazma rezanje s kisikom kao plazmenim plinom je ostvarilo za klasu manje odstupanje u odnosu na zrak. No, treba napomenuti da je pri svim brzinama rezanja nelegiranog čelika pa tako i pri ovim optimalnim, na pojedinim mjestima donjih površina reza dolazilo do stvaranja srha što govori o potrebi naknadne obrade za skidanje istog. Kada je riječ o utjecaju plazmenog plina na brzinu rezanja, pokazalo se da nema prevelike razlike između zraka i kisika kao plazmenih plinova. S upotrebom zraka se postiglo uspješnije rezanje pri većim brzinama rezanja, do 2,5 m/min, dok je s kisikom zadnji uspješni rez ostvaren s brzinom rezanja od 2 m/min. Očekivalo se postizanje većih brzina rezanja (s uspješnim rezovima) pri rezanju nelegiranog čelika s kisikom kao plazmenim plinom zbog oksidirajućeg djelovanja na talinu metala, no i sadržaj kisika u zraku ($\approx 21\%$) pokazao se kao dostatan za postizanje istih ili za nijansu većih brzina rezanja.

3.5. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2

3.5.1. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Uzorci su prema planu pokusa izrezani u Laboratoriju za zavarivanje (*slika 3.20.*), različitim brzinama rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene brzine rezanja te plazmenog plina na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, tolerancija okomitosti ili kutnosti). Ostali parametri procesa rezanja nehrđajućeg čelika su držani konstantnima (*tablica 3.19.*). Navedene značajke kvalitete rezanja klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013.



Slika 3.20. Uzorci nehrđajućeg čelika nakon rezanja – plazmeni plin zrak

Tablica 3.19. Parametri rezanja nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Zrak	1,1	1	2	80	6,5
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

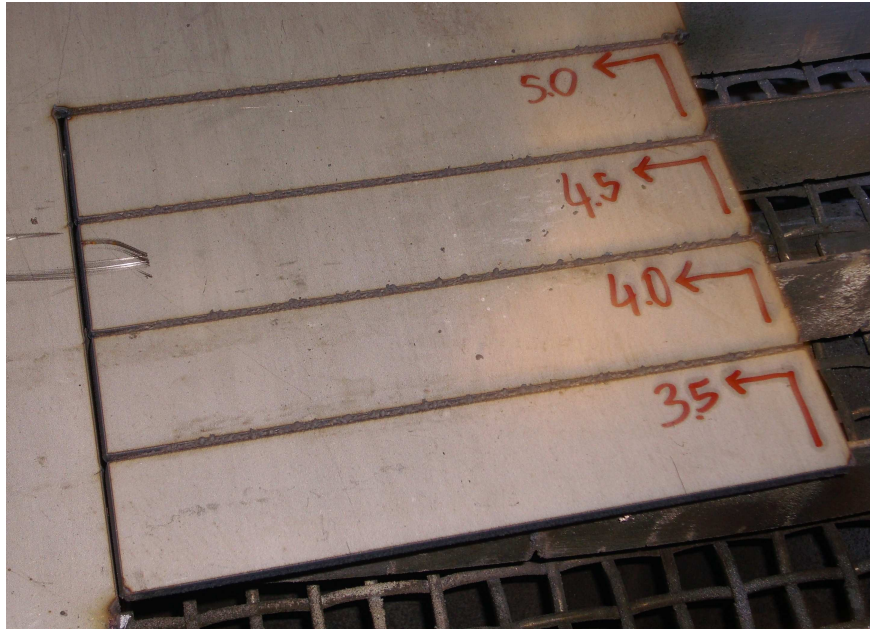
Nakon izrade „češlja“ pristupilo se odrezivanju uzoraka kako bi se mogla izvesti ispitivanja značajki kvalitete površine reza (slika 3.21.).



Slika 3.21. Odrezivanje uzoraka nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Nakon odrezivanja uzoraka vidjelo se da nije pri svim brzinama rezanja došlo do potpunog rezanja materijala. Brzinama rezanja, od 1 do 3 m/min došlo je do potpunog rezanja materijala te su na tim uzorcima ispitivane značajke kvalitete površine reza.




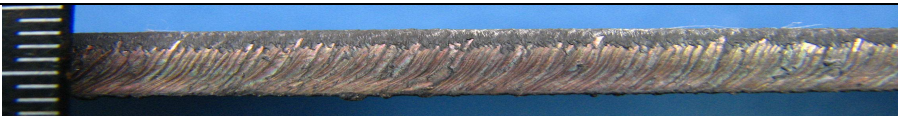

Pri većim brzinama, od 3,5 do 5 m/min nije došlo do penetriranja plazme kroz materijal, nego je zbog prevelikih brzina rezanja, na gornjoj površini materijala došlo do stvaranja srha (slika 3.22.).



Slika 3.22. Uzorci kod kojih nije postignuto rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

U *tablici 3.20.* prikazane su površine reza uspješno izrezanih uzoraka i to u smjeru napredovanja rezanja. Prikaz je dat kako bi se i prije ispitivanja značajki kvalitete rezanja, vidio utjecaj promjene brzine rezanja na dobivenu površinu reza. Iz samih slika se vidi da su dobivene hrapave i nitirane površine reza, što je utjecaj korištenja zraka kao plazmenog plina pri rezanju nehrđajućih čelika. Isto tako, dobiveni su nejednoliki rezovi te će se zbog toga hrapavost površine ispitivati samo na određenim mjestima površine reza. Također se može zaključiti da rezanjem nisu dobivene okomite površine reza te da će se javiti veća odstupanja od tolerancije okomitosti ili kutnosti.

Tablica 3.20. Izgled površina reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Smjer rezanja		Slike uzoraka nakon rezanja —————▶
Uzorak	v (m/min)	Konstantni parametri: plin – zrak, promjer sapnice – 1,1 mm, udaljenost sapnice od lima – 2 mm, struja rezanja – 80 A, tlak plina – 6,5 bar
1.	1	
2.	1,5	
3.	2	
4.	2,5	
5.	3	

3.5.2. Mjerenje hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Mjerenje je izvršeno u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSSB) na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine, perthometer S8P. Izvršena su mjerenja na tri mjesta površine reza te su dobivene srednje vrijednosti navedenih veličina hrapavosti površine, standardne devijacije, rasponi te minimumi i maksimumi izmjerenih veličina (*tablica 3.21.*). S tim da treba napomenuti da se zbog osjetljivosti ticala mjerenje radilo samo na određenim mjestima površine reza, odnosno na mjestima bez srha, eventualnih brazda i slično. No, i norma isto tako kazuje da ispitivana mjesta radnih komada trebaju biti očišćena, bez srha i oksidirane površine, itd.

Tablica 3.21. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

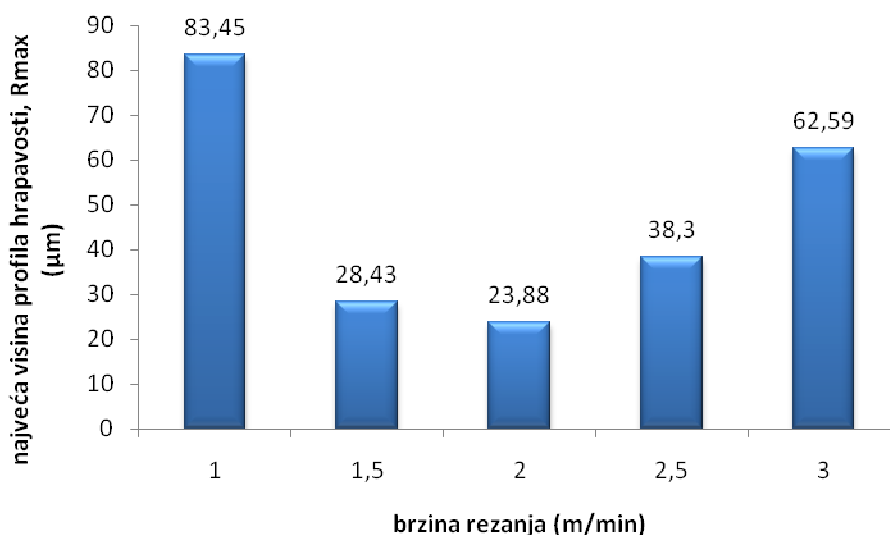
Uzorak 1 (brzina rezanja= 1 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	83,45	16,47	31,38	96,24	64,86
R_z	64,88	10,69	20,99	76,54	55,55
R_a	14,22	2,04	3,81	16,56	12,75
R_p	53,93	11,13	20,25	61,38	41,13
W	49,70	16,31	31,78	63,46	31,68
Uzorak 2 (brzina rezanja= 1,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	28,43	5,86	11,71	34,23	22,52
R_z	21,68	2,19	4,14	23,33	19,19
R_a	4,32	0,70	1,24	5,13	3,88
R_p	17,57	3,53	6,41	19,92	13,51
W	21,64	1,98	3,79	23,86	20,07
Uzorak 3 (brzina rezanja= 2 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	23,88	2,62	4,83	26,89	22,06
R_z	19,18	1,43	2,62	20,82	18,20
R_a	3,70	0,27	0,47	4,01	3,54
R_p	13,15	0,66	1,19	13,91	12,72
W	17,36	4,90	9,22	22,93	13,72
Uzorak 4 (brzina rezanja= 2,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	38,30	17,14	33,00	57,47	24,47
R_z	23,44	2,10	4,19	25,63	21,44
R_a	4,68	0,34	0,60	5,07	4,47
R_p	26,49	13,27	24,99	41,56	16,58
W	37,72	17,35	34,69	55,00	20,31

Tablica 3.21. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak – nastavak

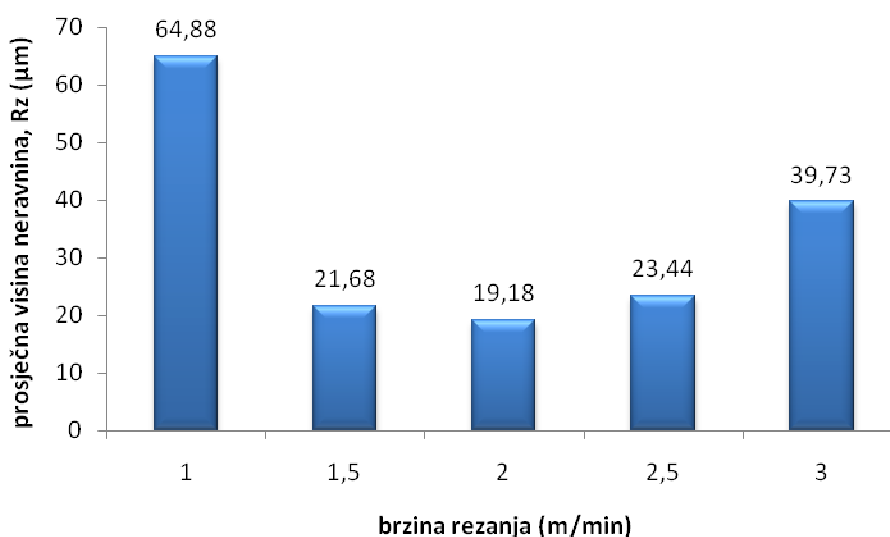
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 5 (brzina rezanja= 3 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	62,59	35,12	68,68	92,67	23,99
R_z	39,73	20,03	38,32	55,51	17,19
R_a	7,88	3,88	7,64	11,28	3,65
R_p	41,43	22,69	44,67	61,46	16,79
W	50,07	40,85	79,57	95,20	15,63

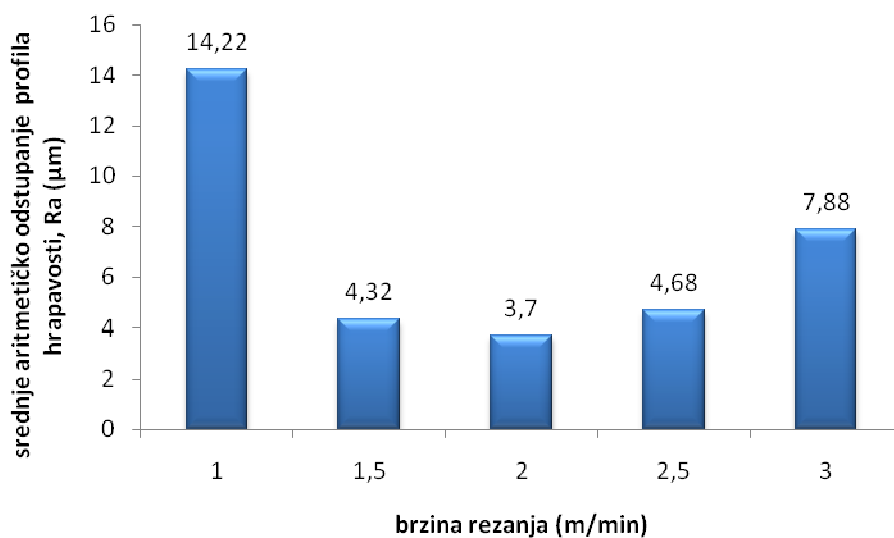
Nadalje, prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – R_z . Prema *tablici 2.7. i slici 2.23.* određena je klasa hrapavosti uzoraka. U spomenutoj tablici nalaze se određene vrijednosti veličine R_z za pojedinu klasu hrapavosti, tako npr. uzorci koji imaju vrijednosti hrapavosti do $40 + (0,8a \text{ mm})$ u μm , gdje je a – debljina lima, spadaju u drugu klasu kvalitete hrapavosti površine. Iz dobivenih prosječnih rezultata veličine R_z , vidljivo je da je uz optimalne parametre rezanja moguće postići najviše drugu klasu ili područje hrapavosti. U ovom slučaju svi uzorci osim prvog (brzina rezanja= 1 m/min) spadaju u drugu klasu kvalitete hrapavosti, dok spomenuti uzorak spada u klasu niže. Što se tiče svih veličina hrapavosti, kao i spomenute, klasificirane veličine R_z , najbolja (najmanja) hrapavost je dobivena na trećem uzorku s brzinom rezanja 2 m/min. Povećanjem brzine rezanja dobijale su se grublje površine reza, samim time i veće vrijednosti veličina hrapavosti površine. Na *slikama 3.23. do 3.27.* prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti pojedinih uzoraka te njihovo mijenjanje u ovisnosti o brzini rezanja.



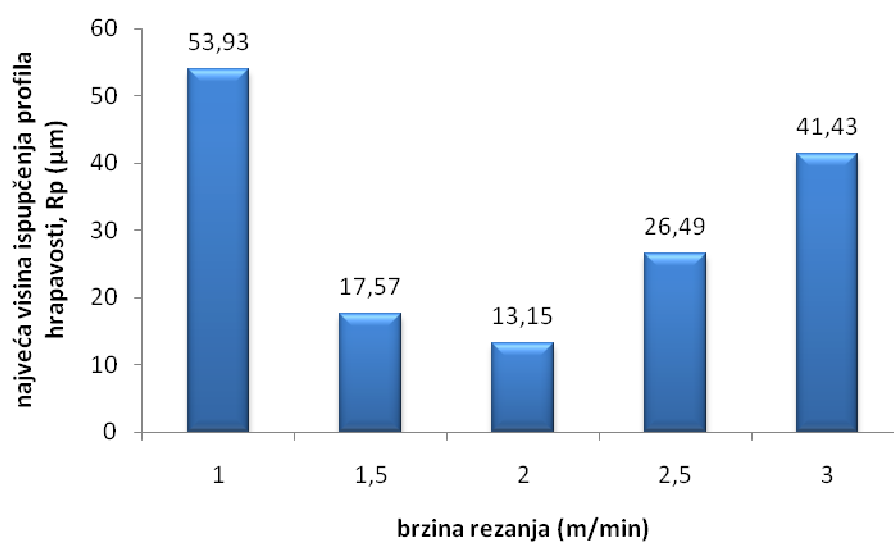
Slika 3.23. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak



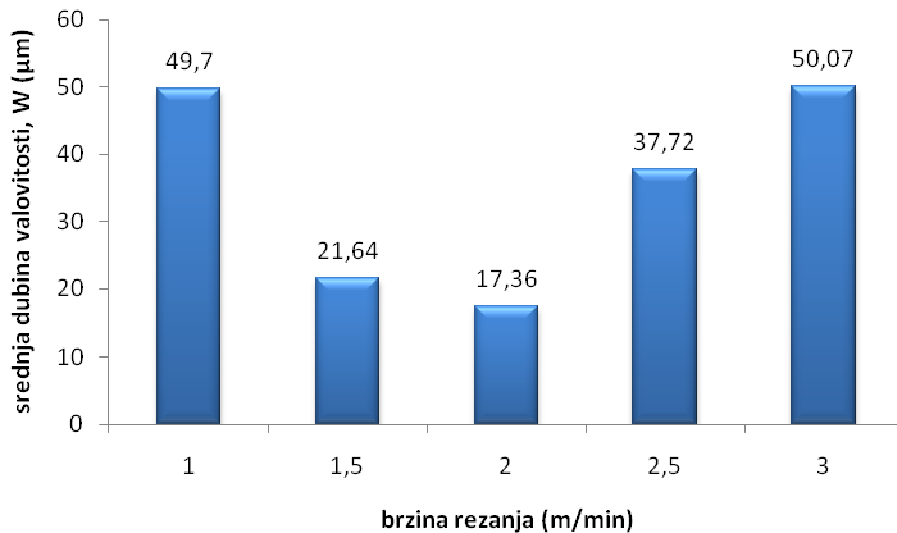
Slika 3.24. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.25. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.26. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak



Slika 3.27. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak

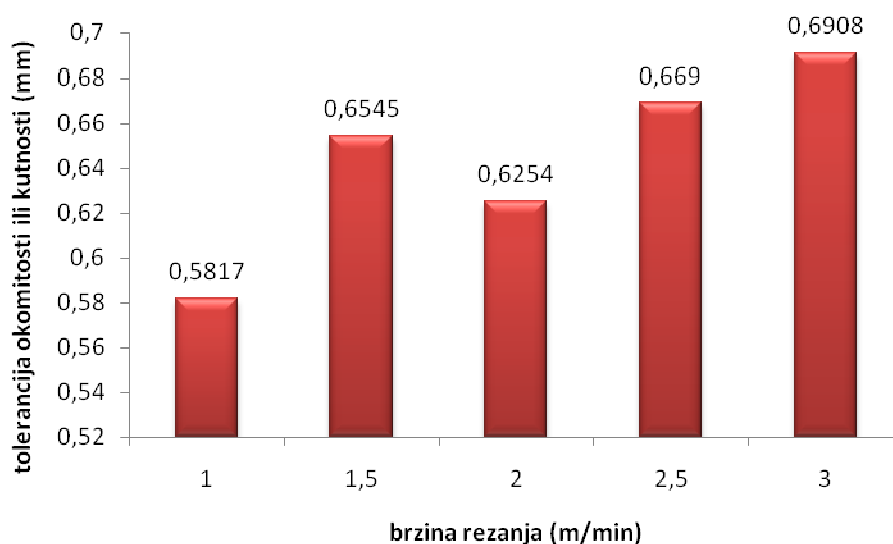
3.5.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza nehrđajućeg čelika – plazmeni plin zrak

Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti izvršeno je uz pomoć kutomjera, koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB). Mjerio se kut između gornje i donje površine reza te se dobivena vrijednost oduzimala od pravog kuta, kako bi se dobilo stvarno odstupanje uzorka od okomitosti ili kutnosti. Ta vrijednost se zatim preračunavala iz stupnjeva u milimetre, kako bi se tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirala prema normi HRN EN ISO 9013 (*tablica 3.22.*). Mjerenje se radilo na istim uzorcima na kojima se mjerila i hrapavost površine reza, ostali uzorci nisu uzimani u obzir zbog nepotpunih rezova.

Tablica 3.22. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (°)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
1.	1	13°20'	0,5817
2.	1,5	15°	0,6545
3.	2	14°20'	0,6254
4.	2,5	15°20'	0,6690
5.	3	15°50'	0,6908

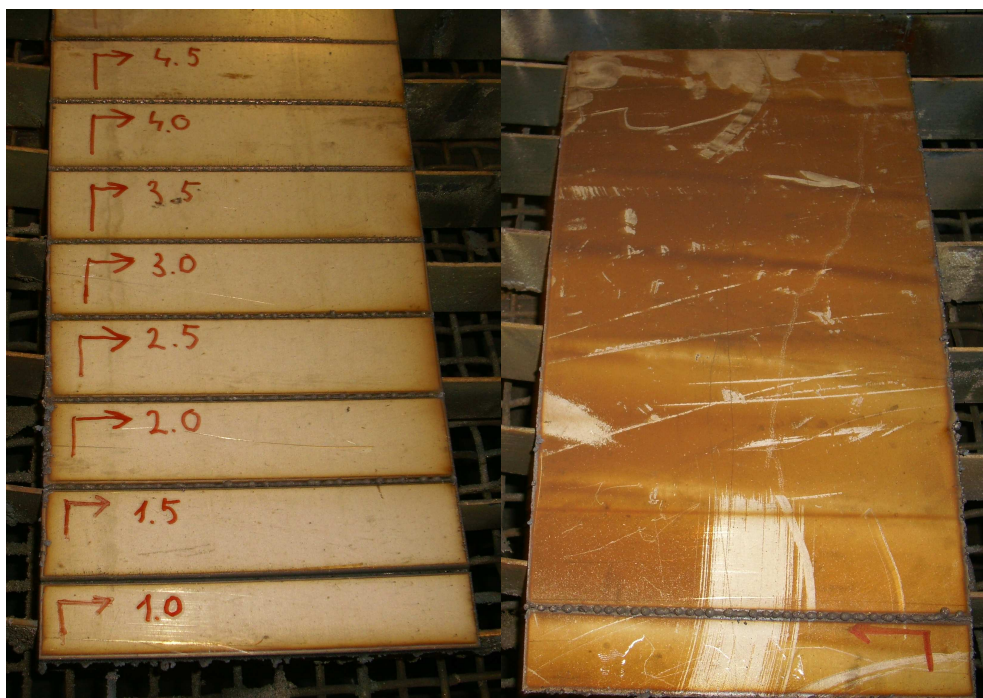
Nadalje, dobivene vrijednosti tolerancija kutnosti ili okomitosti treba svrstati u određenu klasu prema normi HRN EN ISO 9013. Iz samih rezultata se vidi da su dobivene vrlo male razlike u kutnosti između mjerenih uzoraka, odnosno promjena brzine nije previše povećavala odstupanja. Prema *tablici 2.6* i *slici 2.22* u kojima se nalaze rasponi odstupanja kutnosti ili okomitosti određene su klase kvalitete rezanja. Prema dobivenim rezultatima svi uzorci spadaju u četvrtu klasu tolerancija okomitosti ili kutnosti, što govori o dosta velikim odstupanjima. Prikaz mijenjanja tolerancije okomitosti ili kutnosti s brzinom rezanja dat je na *slici 3.28*.



Slika 3.28. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – nehrđajući čelik – plazmeni plin zrak

3.5.4. Plazma rezanje nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik

Rezanje nehrđajućeg čelika s dušikom kao plazmenim plinom nije dalo nikakve uspješne rezultate. Naime, niti jednom brzinom rezanja, među kojima je i kataloška preporučena brzina rezanja, nije došlo do rezanja materijala (slika 3.29.). Samo je s brzinom rezanja od 1 m/min došlo do mjestimičnog zavarivanja na donjoj strani materijala, odnosno do stvaranja srha na donjoj strani površine lima, dok se s ostalim brzinama vide samo tragovi unošenja visokih toplinskih opterećenja (slika 3.29. – desno). Svi parametri procesa dani su u tablici 3.23. Ovakvi rezultati mogu se pripisati inertnosti dušika kao plazmenog plina, odnosno dušik ne reagira s materijalom te se tako ne proizvodi potrebna dodatna energija za rezanje materijala (obrnuto slučaj nego sa zrakom). Trebalo bi eventualno pokušati s povećanjem struje rezanja i većom od 250 A kako bi se nadoknadio manjak energije. No, zbog ograničenosti korištenog plazma izvora za rezanje takva ispitivanja nije bilo moguće provesti. Sukladno tomu, odabir optimalnih parametara za rezanje nehrđajućeg čelika će ostati na zraku kao plazmenom plinu.



Slika 3.29. Gornja (lijevo) i donja (desno) strana uzoraka nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik


Tablica 3.23. Parametri rezanja nehrđajućeg čelika – plazmeni plin dušik

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Dušik	1,1	1	2	80	4,5
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

3.5.5. Usporedba kvalitete rezanja nehrđajućeg čelika

Iz prethodnih slika uzoraka obaju plazmenih plinova se vidi da s dušikom kao plazmenim plinom nije došlo do rezanja niti pri jednoj odabranoj brzini. To se pripisuje nedostatku dodatne energije za rezanje zbog inertnosti dušika. Pri upotrebi zraka kao plazmenog plina, zbog njegovog oksidirajućeg djelovanja na talinu metala dobiveni su bolji rezultati rezanja. Ukupno gledajući, kvalitativno i kvantitativno, optimalna brzina rezanja nehrđajućeg čelika debljine 5 mm s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 2 m/min. Spomenutom brzinom rezanja prema normi HRN EN ISO 9013 postignuta je druga klasa hrapavosti površine te četvrta klasa tolerancije okomitosti ili kutnosti. Osim klasificirane veličine hrapavosti površine – Rz, brzina rezanja od 2 m/min dala je i u ostalim mjerenim vrijednostima hrapavosti površine najbolje rezultate (*tablica 3.24.*). Isto tako, spomenuti uzorak ima najmanji raspon (max-min) izmjerenih vrijednosti veličina hrapavosti površine, što govori da se s tom brzinom rezanja dobila i najujednačenija površina reza.

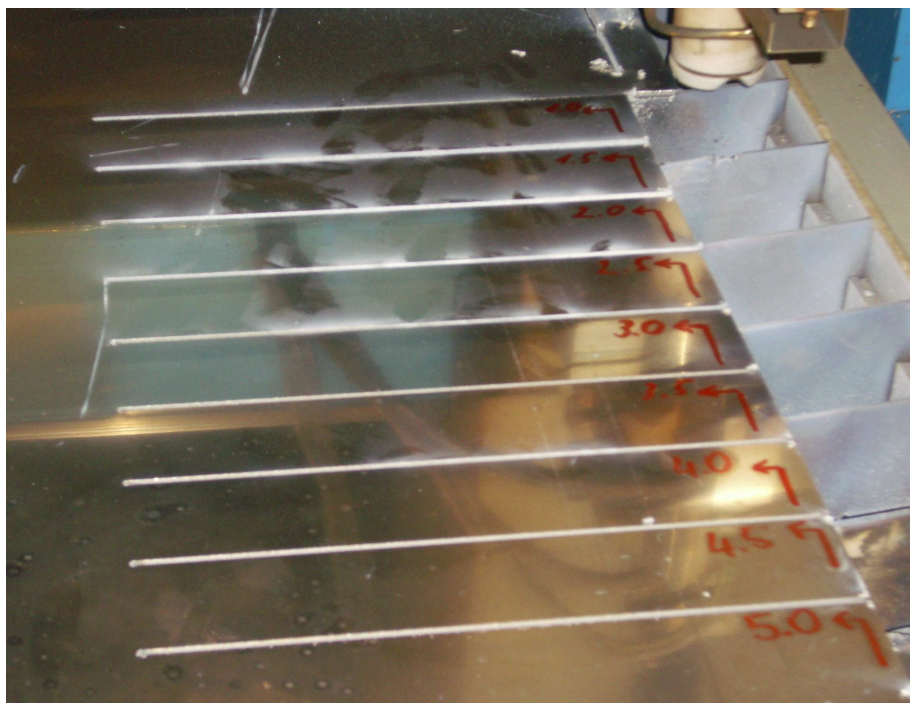
Tablica 3.24. Značajke kvalitete optimalnog reza nehrđajućeg čelika

Slika uzorka					
Brzina rezanja (m/min)	2				
Hrapavost površine (μm)	R _{max}	R _z	R _a	R _p	W
	23,88	19,18	3,7	13,15	17,36
Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)	0,6254				

3.6. Plazma rezanje Al legure AlMg3

3.6.1. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin zrak

Uzorci Al legure također su prema planu pokusa izrezani u Laboratoriju za zavarivanje. Kao i dosad, nakon izrade lima u obliku češlja (*slika 3.30.*) pristupilo se odrezivanju uzoraka s ciljem utvrđivanja kvalitete površine reza Al legure. Parametri procesa rezanja Al legure debljine 4 mm navedeni su u *tablici 3.25.*



Slika 3.30. Uzorci Al legure – plazmeni plin zrak

Tablica 3.25. Parametri rezanja Al legure – plazmeni plin zrak

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Zrak	1,1	1	2	80	6,5
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

U tablici 3.26. prikazani su uzorci, odnosno površine reza u smjeru rezanja. Već se prema tim slikama može zaključiti o promjeni kvalitete površine reza s mijenjanjem brzine rezanja. Vidi se da se brzinama rezanja od 1 do 2,5 m/min dobija jako hrapava i gruba površina pa tako ti uzorci neće ni biti uzimani u obzir pri mjerenju i klasifikaciji značajki kvalitete rezanja. Isto tako, kao rezultat malih brzina rezanja dolazi do pojave stvaranja srha na donjoj površini reza, koji je lako ukloniti za razliku od srha koji nastaje pri velikim brzinama rezanja. S brzinama rezanja od 3 do 5 m/min dobivena je finija površina reza, s time da je s povećanjem brzine rezanja dobijana sve finija i sjajnija površina reza.

Tablica 3.26. Izgled površina reza Al legure – plazmeni plin zrak

Smjer rezanja		Slike uzoraka nakon rezanja	
Uzorak	v (m/min)	→	
		Konstantni parametri: plin – zrak, promjer sapnice – 1,1 mm, udaljenost sapnice od lima – 2 mm, struja rezanja – 80 A, tlak plina – 6,5 bar	
1.	1		
2.	1,5		
3.	2		
4.	2,5		
5.	3		
6.	3,5		
7.	4		
8.	4,5		
9.	5		

3.6.2. Mjerenje hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak

Mjerenje je izvršeno u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSSB) na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine, perthometer S8P. Izvršena su mjerenja na tri mjesta površine reza te su dobivene srednje vrijednosti veličina hrapavosti površine, standardne devijacije, rasponi te samim time minimumi i maksimumi izmjerenih veličina. Zbog grubih površina reza uzoraka te eventualnih oštećenja ticala uređaja mjerenje se nije radilo na svim uzorcima, nego samo na uzorcima izrezanim brzinama od 3 do 5 m/min (*tablica 3.27.*).

Tablica 3.27. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

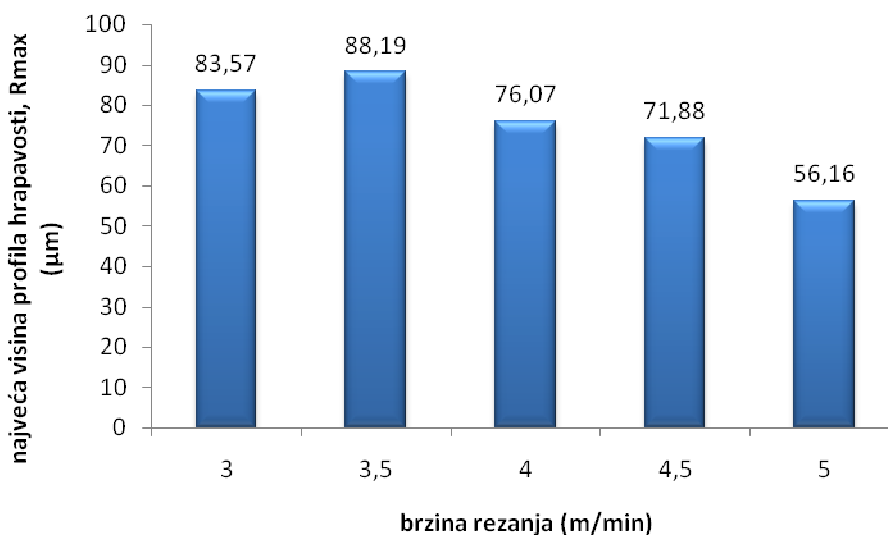
Uzorak 5 (brzina rezanja= 3 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	83,57	4,53	8,70	87,19	78,49
R_z	65,69	10,64	20,13	73,77	53,64
R_a	13,72	1,81	3,25	14,88	11,63
R_p	46,60	8,51	15,12	51,91	36,79
W	55,71	12,46	23,41	69,89	46,48
Uzorak 6 (brzina rezanja=3,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	88,19	9,01	10,01	97,24	79,22
R_z	70,86	5,89	11,03	75,19	64,16
R_a	14,35	2,24	4,39	16,79	12,41
R_p	55,92	0,46	0,90	56,42	55,52
W	50,13	17,02	33,34	64,83	3,49
Uzorak 7 (brzina rezanja= 4 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	76,07	21,88	43,36	96,02	52,67
R_z	51,41	18,20	35,00	71,79	36,80
R_a	8,93	2,97	5,87	12,14	6,26
R_p	49,27	12,72	24,08	58,94	34,87
W	25,91	10,26	20,03	34,65	14,61
Uzorak 8 (brzina rezanja= 4,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	71,88	21,52	42,89	92,26	49,37
R_z	51,92	14,59	27,27	68,56	41,29
R_a	9,03	3,40	6,01	12,95	6,94
R_p	47,74	15,96	31,91	64,00	32,09
W	34,70	8,27	15,62	40,95	25,33

Tablica 3.27. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin zrak – nastavak

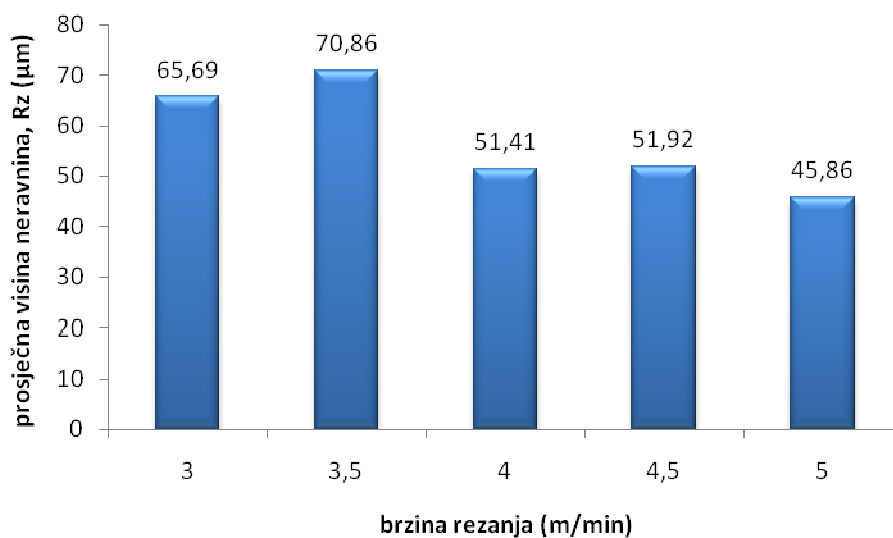
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 9 (brzina rezanja= 5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R_{max}	56,16	12,11	24,19	68,58	44,40
R_z	45,86	11,53	21,55	59,01	37,45
R_a	8,43	1,91	3,68	10,57	6,89
R_p	34,15	7,74	14,49	42,98	28,49
W	32,20	2,91	5,11	35,56	30,45

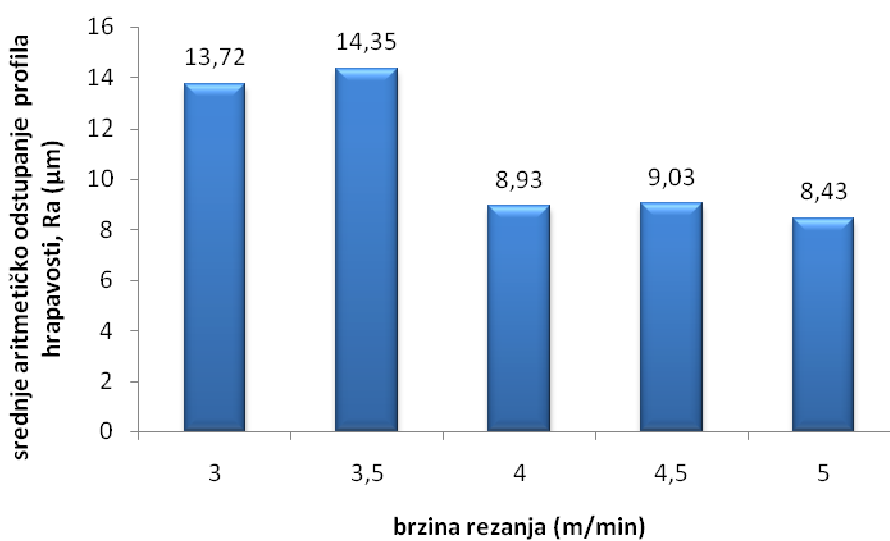
Prema tablici 2.7. i slici 2.23. određena je klasa hrapavosti uzoraka. Prema normi samo je klasificirana prosječna visina neravnina, odnosno veličina R_z . Svi ispitivani uzorci spadaju u treću klasu kvalitete hrapavosti što govori da su dobivene poprilično grube površine rezanja. Najbolji rezultati klasificirane veličine hrapavosti te ostalih mjerenih veličina hrapavosti, osim valovitosti, dobiveni su pri najvećoj brzini rezanja od 5 m/min. Taj podatak je dosta zanimljiv, jer su najbolji rezultati dobiveni s relativno velikom brzinom rezanja za debljinu Al legure od 4 mm, u odnosu na preporučenu katalošku brzinu rezanja. Na slikama 3.31. do 3.35. prikazane su ovisnosti mjerenih veličina hrapavosti površine o brzini rezanja.



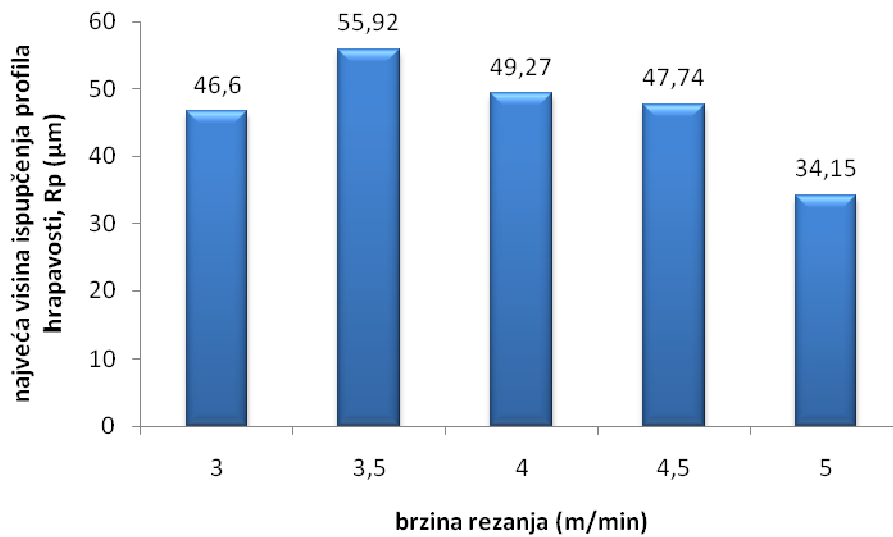
Slika 3.31. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak



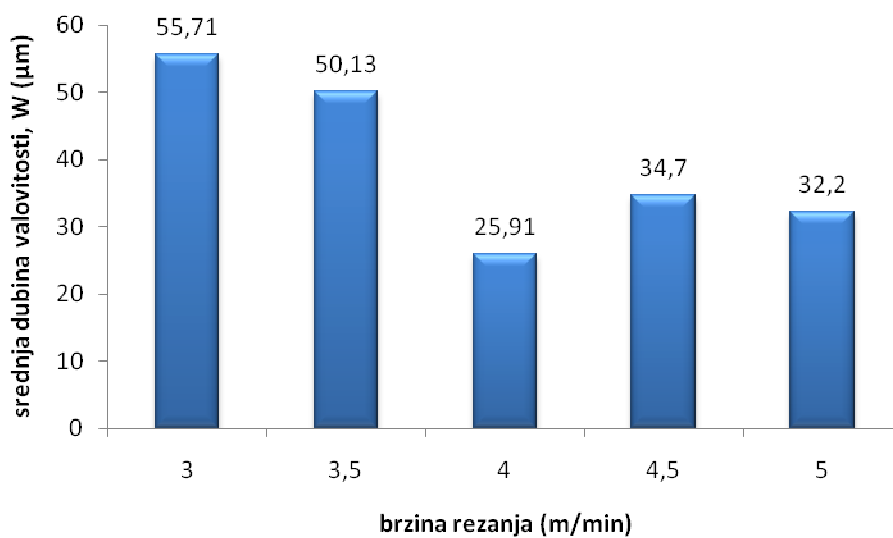
Slika 3.32. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak



Slika 3.33. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak



Slika 3.34. Prikaz ovisnosti najveće visine ispuščenja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak



Slika 3.35. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak

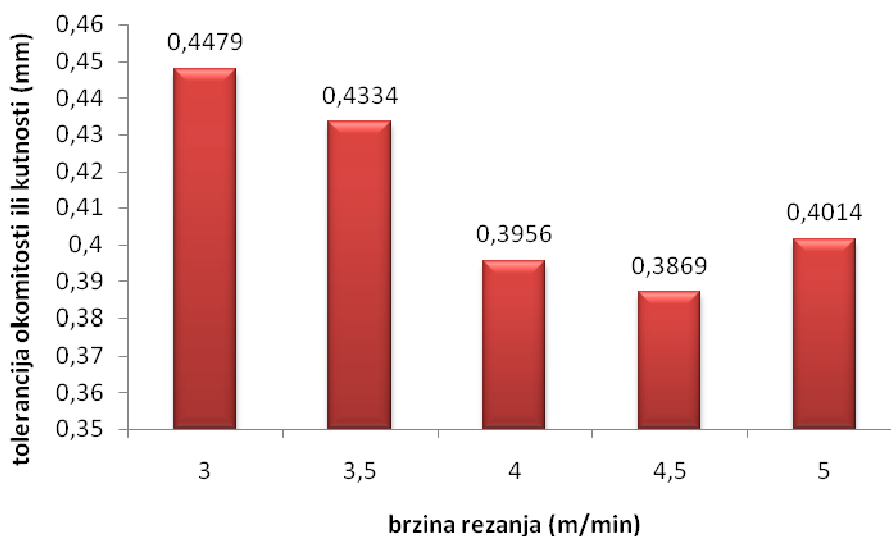
3.6.3. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza Al legure – plazmeni plin zrak

Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti Al legure izvršeno je na isti način kao i dosad, uz pomoć kutomjera koji se nalazi u LFSB – u. Mjeren je kut između gornjeg i donjeg ruba reza, čija se vrijednost oduzimala od pravog kuta. Na taj način dobijeno je stvarno odstupanje od okomitosti ili kutnosti. Kako bi se tolerancija klasificirala prema normi HRN EN ISO 9013, te vrijednosti su se uz pomoć formule za duljinu kružnog luka, preračunavale u jedinicu duljine (tablica 3.28.).

Tablica 3.28. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – Al legura – plazmeni plin zrak

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (°)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
5.	3	12°50'	0,4479
6.	3,5	12°25'	0,4334
7.	4	11°20'	0,3956
8.	4,5	11°05'	0,3869
9.	5	11°30'	0,4014

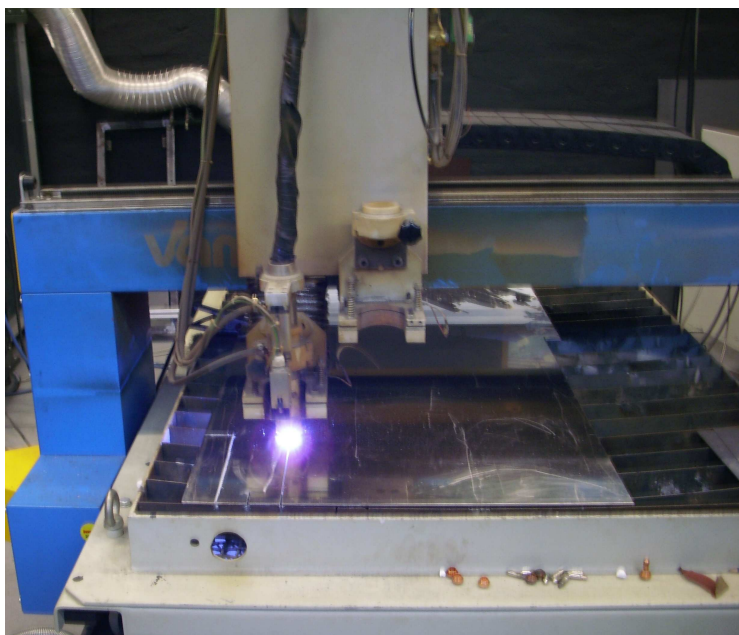
Prema tablici 2.6. i slici 2.22 u kojima se nalaze rasponi odstupanja kutnosti ili okomitosti određene su klase kvalitete rezanja. Svi uzorci osim uzorka s brzinom rezanja od 3 m/min spadaju u treću klasu odstupanja od okomitosti ili kutnosti, dok spomenuti uzorak spada u klasu niže. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja prikazan je na slici 3.36.



Slika 3.36. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin zrak

3.6.4. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Rezanje Al legure sa plazmenim plinom Ar/H₂ (65/35) izvršeno je u Laboratoriju za zavarivanje (FSB). Slika 3.37. prikazuje izvedeno plazma rezanje. Prema planu pokusa brzina rezanja se mijenjala od 1 do 5 m/min, s korakom od 0,5 m/min, dok su ostali parametri rezanja držani konstantnima (tablica 3.29.).







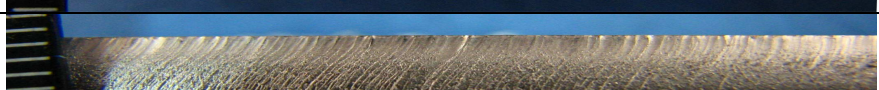




Slika 3.37. Plazma rezanje Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Tablica 3.29. Parametri rezanja Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od lima (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Ar/H ₂	1,1	1	2	70	4,5
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

Prikaz površina reza u smjeru napredovanja rezanja Al legure s plazmenom mješavinom Ar/H₂ dat je u *tablici 3.30*. Iz samih slika se vidi da se kao rezultat malih brzina rezanja javlja srh na donjoj površini reza te su te površine reza znatno grublje od onih pri većim brzinama rezanja. Zbog toga će se kao i u prethodnom primjeru rezanja Al legure, gdje se kao plazmeni plin koristio zrak, značajke kvalitete rezanja ispitivati samo na određenim uzorcima. S brzinama rezanja od 3 do 5 m/min dobivena je finija površina reza, bez pojave srha te će se na tim uzorcima ispitivati značajke kvalitete rezanja.

Tablica 3.30. Izgled površina reza Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Smjer rezanja		Slike uzoraka nakon rezanja	
		→	
Uzorak	v (m/min)	Konstantni parametri: plin – Ar/H ₂ , promjer sapnice – 1,1 mm, udaljenost sapnice od lima – 2 mm, struja rezanja – 70 A, tlak plina – 4,5 bar.	
1.	1		
2.	1,5		
3.	2		
4.	2,5		
5.	3		
6.	3,5		
7.	4		
8.	4,5		
9.	5		

3.6.5. Mjerenje hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Mjerenje je, kao i u prethodno navedenim primjerima izvršeno u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine, perthometer S8P. Hrapavost površine reza se, kao i u slučaju rezanja Al legure zrakom kao plazmenim plinom, mjerila na uzorcima izrezanim brzinama od 3 do 5 m/min. Na ostalim uzorcima se nije mjerila hrapavost zbog pojave srha i grubih površina reza te radi eventualnog oštećenja ticala uređaja za mjerenje hrapavosti površine. Dobivene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure, s Ar/H₂ mješavinom kao plazmenim plinom prikazane su u *tablici 3.31*.

Tablica 3.31. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H₂ (osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

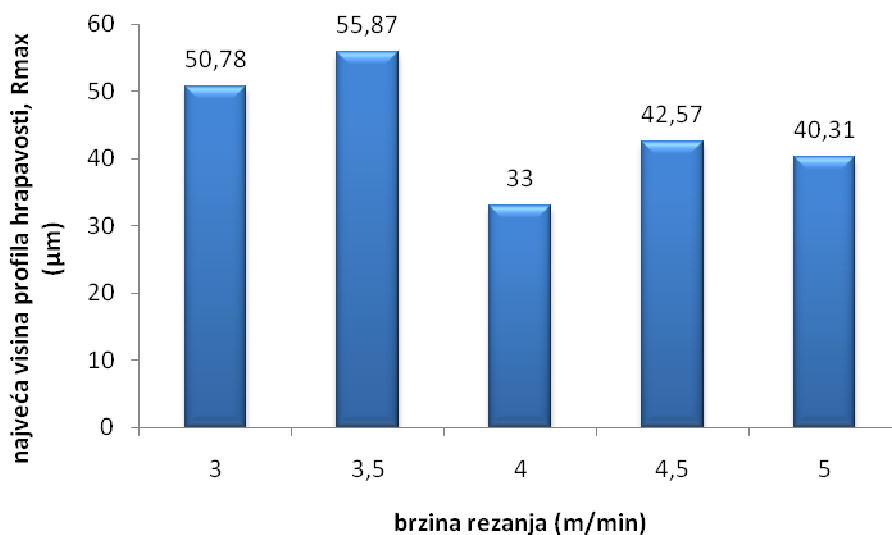
Uzorak 5 (brzina rezanja= 3 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R _{max}	50,78	2,19	4,37	52,93	48,55
R _z	40,34	1,63	2,86	41,32	38,46
R _a	7,17	0,31	0,62	7,47	6,85
R _p	30,64	0,68	1,24	31,10	29,86
W	33,76	2,05	3,84	35,26	31,42
Uzorak 6 (brzina rezanja=3,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R _{max}	55,87	11,32	22,31	68,13	45,82
R _z	41,93	3,26	6,48	44,94	38,47
R _a	7,43	0,45	0,90	7,89	6,99
R _p	32,24	10,40	19,29	44,14	24,85
W	16,20	4,72	9,18	21,43	12,25
Uzorak 7 (brzina rezanja= 4 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R _{max}	33,00	13,58	27,15	46,71	19,55
R _z	28,02	10,56	20,78	37,32	16,53
R _a	5,23	1,88	3,61	6,72	3,11
R _p	20,41	8,20	16,38	28,81	12,43
W	24,82	7,58	15,14	32,17	17,04

Tablica 3.31. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza Al legure – plazmeni plin Ar/H₂
– nastavak

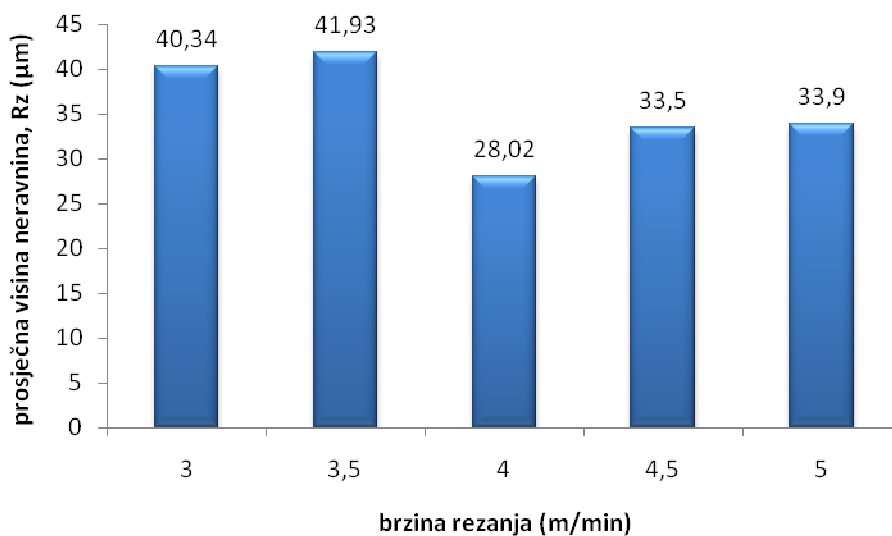
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 8 (brzina rezanja= 4,5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R _{max}	42,57	5,98	10,55	46,22	35,67
R _z	33,50	4,17	7,26	38,31	31,05
R _a	5,61	0,52	1,00	6,18	5,18
R _p	26,40	5,09	9,95	30,76	20,81
W	19,70	3,22	5,74	23,41	17,67
Uzorak 9 (brzina rezanja= 5 m/min)					
Veličine hrapavosti (μm)	X – srednja vrijednost	S–standardna devijacija	R – raspon	Max	Min
R _{max}	40,31	14,30	28,58	54,31	25,73
R _z	33,90	10,22	20,36	43,51	23,16
R _a	6,70	2,13	4,20	9,00	4,80
R _p	25,37	6,49	11,74	29,64	17,90
W	36,15	0,28	0,56	36,40	35,84

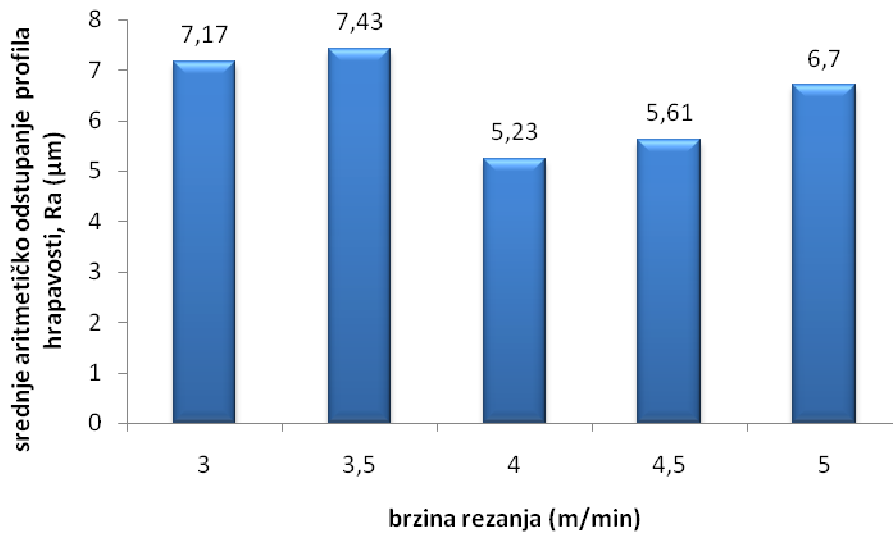
Dobivene vrijednosti hrapavosti površina, odnosno vrijednosti prosječne visine neravnina R_z je potrebno klasificirati prema normi HRN EN ISO 9013. Prema *tablici 2.7. i slici 2.23.* određena je klasa hrapavosti uzoraka. Svi uzorci imaju jako dobre rezultate hrapavosti površine reza, a spadaju u drugu klasu ili područje hrapavosti. Uzorak 7, s brzinom rezanja od 4 m/min ima najbolje rezultate klasificirane prosječne visine neravnina R_z, u srednjem iznosu od 28,02 μm. Na *slikama 3.38. do 3.42.* prikazane su ovisnosti izmjerenih veličina hrapavosti o brzini rezanja.



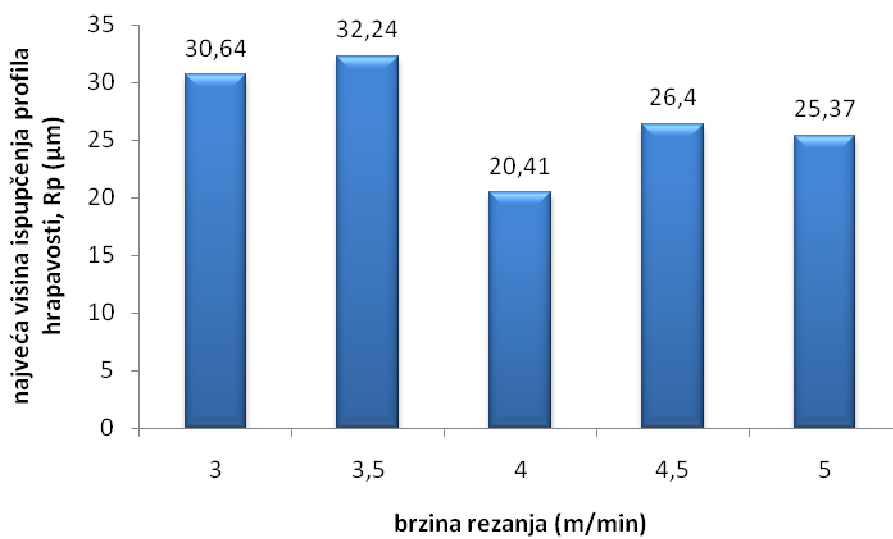
Slika 3.38. Prikaz ovisnosti najveće visine profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂



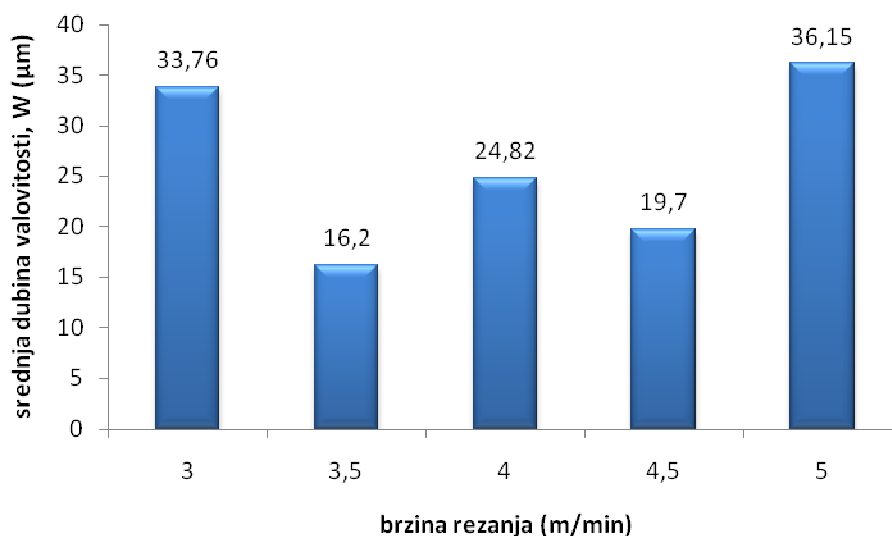
Slika 3.39. Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂



Slika 3.40. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂



Slika 3.41. Prikaz ovisnosti najveće visine ispupčenja profila hrapavosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂



Slika 3.42. Prikaz ovisnosti srednje dubine valovitosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂

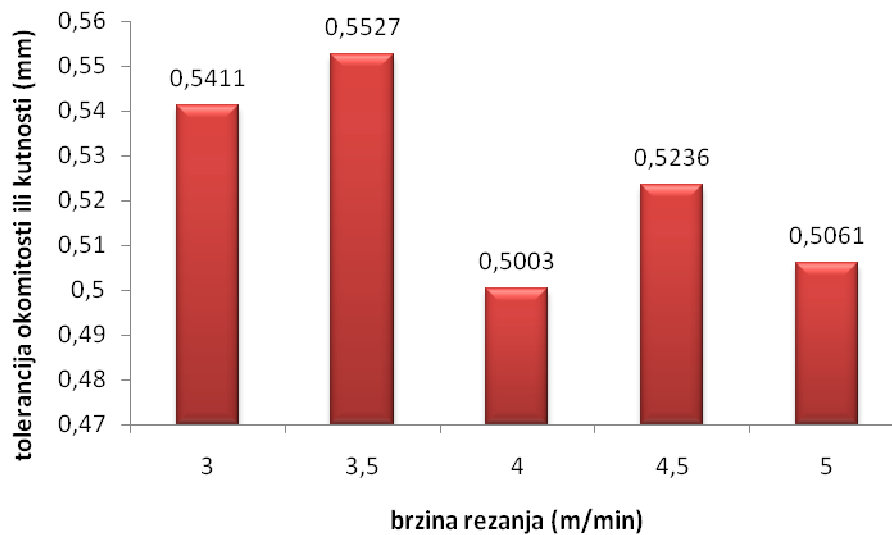
3.6.6. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza Al legure – plazmeni plin Ar/H₂

Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti izvršeno je uz pomoć kutomjera koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB). Mjerio se kut između gornje i donje površine reza te se dobivena vrijednost oduzimala od pravog kuta, kako bi se dobilo stvarno odstupanje uzorka od okomitosti ili kutnosti. Ta vrijednost se zatim preračunavala iz stupnjeva u milimetre, kako bi se tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirala prema normi HRN EN ISO 9013. Mjerenje se radilo na istim uzorcima na kojima se mjerila i hrapavost površine reza, ostali uzorci nisu uzimani u obzir zbog grubih površina reza i pojave srha. Dobiveni rezultati u stupnjevima i u jedinici duljine prikazani su u *tablici 3.32.*

Tablica 3.32. Vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (°)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
5.	3	15°30'	0,5411
6.	3,5	15°50'	0,5527
7.	4	14°20'	0,5003
8.	4,5	15°	0,5236
9.	5	14°30'	0,5061

Nakon mjerenja i dobivenih rezultata, tolerancije okomitosti ili kutnosti treba svrstati u određenu klasu prema normi HRN EN ISO 9013. Prema *tablici 2.6* i *slici 2.22* određene su klase kvalitete rezanja. Prema dobivenim rezultatima svi mjereni uzorci spadaju u četvrtu klasu ili područje odstupanja od okomitosti ili kutnosti te se može zaključiti da su dobijena dosta velika odstupanja mjerene značajke kvalitete rezanja. Prikaz mijenjanja tolerancije okomitosti ili kutnosti s brzinom rezanja dat je na *slici 3.43*.

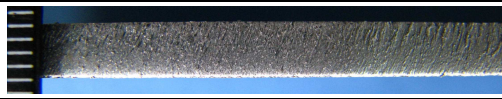



Slika 3.43. Prikaz ovisnosti tolerancije okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja – Al legura – plazmeni plin Ar/H₂

3.6.7. Usporedba kvalitete rezanja Al legure

Nakon svih izvršenih ispitivanja značajki kvalitete reza te obrade eksperimentalnih podataka, u *tablici 3.33.* prikazana je usporedba kvalitete reza izvedenih s optimalnim brzinama rezanja Al legure debljine 4 mm, s zrakom kao plazmenim plinom te Ar/H₂ mješavinom plinova. Iz rezultata vidljive su značajne razlike dobivenih rezultata u svim uspoređivanim stanjima plana pokusa. Optimalna brzina rezanja Al legure s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 5 m/min, dok pri korištenju Ar/H₂ plazmene mješavine optimalna brzina rezanja iznosi 4 m/min.

Tablica 3.33. Usporedba kvalitete rezanja Al legure

Plazmeni plin	Zrak	Ar/H ₂
		
v (m/min)	5	4
Hrapavost površine (μm)		
Rmax	56,16	33,00
Rz	45,86	28,02
Ra	8,43	5,23
Rp	34,15	20,41
W	32,20	24,82
Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)		
u	0,4014	0,5003

Ar/H₂ mješavina plinova se pokazala boljom u odnosu na zrak pri plazma rezanju Al legure, odnosno s tom mješavinom se dobija dosta finija, sjajnija i bolja kvaliteta hrapavosti površine reza. Sve veličine hrapavosti površine pokazale su bolje rezultate s upotrebom Ar/H₂ mješavine, dok klasificirana prosječna visina neravnina Rz spada u drugu klasu ili područje hrapavosti površine reza. S upotrebom zraka dobila se treća klasa ili područje prosječne visine neravnina Rz te značajno lošiji rezultati u odnosu na Ar/H₂ mješavinu, kako veličine Rz, tako i ostalih mjerenih veličina hrapavosti površine.

Druga mjerena značajka kvalitete reza, tolerancija okomitosti ili kutnosti je pokazala veća odstupanja te malo drukčije ponašanje u odnosu na hrapavost površine reza. Upotrebom zraka kao plazmenog plina dobilo se manje odstupanje od kutnosti te prema normi HRN EN ISO 9013 treća klasa ili područje odstupanja od okomitosti ili kutnosti, dok se Ar/H₂ mješavinom dobila klasa niže, odnosno četvrto područje odstupanja mjerene veličine. S te strane, oba plazmena plina pokazala su povećana odstupanja od okomitosti ili kutnosti te samim time eventualnu potrebu naknadne obrade prije slijedeće tehnološke operacije.

4. Zaključak

U teoretskom dijelu rada opisan je postupak plazma rezanja, njegove inačice te prednosti i nedostaci pojedinih postupaka rezanja. Opisana je i pripadajuća oprema za plazma rezanje te utjecaj parametara na kvalitetu plazma rezanja. Isto tako, objašnjena je i norma HRN EN ISO 9013 prema kojoj se određivala kvaliteta reza.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je plazma rezanje određenih vrsta materijala (nelegirani čelik, nehrđajući čelik, Al legura) na plazma sustavu za rezanje SPARCIN 900M u Laboratoriju za zavarivanje (FSB). Raspon brzina rezanja iznosio je od 1 m/min do 5 m/min, s korakom od 0,5 m/min. Razmatran je utjecaj plazmenih plinova na kvalitetu reza i brzinu rezanja te su utvrđeni optimalni parametri za sve osnovne materijale. Kvaliteta površine reza je klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013, dok se od značajki kvalitete rezanja ispitivala hrapavost površine te tolerancija okomitosti ili kutnosti.

Plazma rezanje nelegiranog čelika debljine 5 mm provedeno je s zrakom i kisikom kao plazmenim plinovima. S zrakom kao plazmenim plinom se uspješno rezalo pri brzinama od 1 do 2,5 m/min, dok pri ostalim brzinama rezanja nije došlo do penetracije plazme kroz materijal. Značajke kvalitete površine reza su ispitivane samo na uspješno dobivenim rezovima. Postignute su jako dobre klase kvalitete hrapavosti te svi uzorci osim prvog ($v=1$ m/min) spadaju u prvu klasu hrapavosti površine, dok spomenuti prvi uzorak spada u klasu niže. Tolerancije okomitosti ili kutnosti bilježe veća odstupanja te spadaju u treću i četvrtu klasu odstupanja mjerene veličine. Optimalna brzina rezanja nelegiranog čelika s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 2 m/min, a s njom se postiže prva klasa hrapavosti površine iznosa $Rz\ 9,44\ \mu\text{m}$ te četvrta klasa odstupanja od okomitosti ili kutnosti, iznosa 0,5018 mm. Rezanjem nelegiranog čelika s kisikom kao plazmenim plinom postignuta je bolja kvaliteta površine reza, iako je uspješno rezanje izvedeno samo pri brzinama od 1 do 2 m/min. Svi ispitivani uzorci spadaju u prvu klasu hrapavosti površine, dok dobivene vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti spadaju u treću, odnosno četvrtu klasu (uzorak 3; $v=2$ m/min). Optimalna brzina rezanja nelegiranog čelika s kisikom kao plazmenim plinom iznosi 1,5 m/min, a s njom se postiže prva klasa hrapavosti površine iznosa $Rz\ 6,45\ \mu\text{m}$ te treća klasa odstupanja od okomitosti ili kutnosti, iznosa 0,3345 mm.

Plazma rezanje nehrđajućeg čelika debljine 5 mm provedeno je s zrakom i dušikom kao plazmenim plinovima. S zrakom se uspješno rezalo pri brzinama od 1 do 3 m/min te su se na tim uzorcima ispitivale značajke kvalitete površine reza. Postignute su dobre klase kvalitete hrapavosti površine. Svi uzorci osim prvog ($v=1$ m/min) spadaju u drugu klasu hrapavosti površine, dok spomenuti uzorak spada u klasu niže. Što se tiče druge značajke kvalitete površine reza, tolerancije okomitosti ili kutnosti, svi uzorci spadaju u četvrtu klasu odstupanja mjerene veličine. Optimalna brzina rezanja nehrđajućeg čelika s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 2 m/min, a s njom se postiže druga klasa hrapavosti iznosa $Rz\ 19,18\ \mu\text{m}$ te četvrta klasa odstupanja od okomitosti ili kutnosti, iznosa 0,6254 mm. Rezanje nehrđajućeg čelika s dušikom kao plazmenim plinom nije dalo uspješne rezultate, odnosno niti pri jednoj brzini rezanja nije došlo do potpune penetracije plazme kroz materijal.

Plazma rezanje Al legure debljine 4 mm provedeno je s zrakom kao plazmenim plinom te s Ar/H_2 (65/35) mješavinom plinova. Pri svim brzinama došlo je do potpunog rezanja, ali su se značajke kvalitete reza ispitivale samo na određenim uzorcima. Uzorci odrezani brzinama od 1 do 2,5 m/min nisu uzimani u obzir zbog pojave srha i grubih površina reza. S zrakom kao plazmenim plinom postignute su treće klase hrapavosti površine svih ispitivanih uzoraka. Tolerancije okomitosti ili kutnosti spadaju u treću klasu odstupanja, osim uzorka s brzinom rezanja 3 m/min, koji spada u klasu niže. Optimalna brzina rezanja Al legure s zrakom kao plazmenim plinom iznosi 5 m/min, a s njom se postiže treća klasa hrapavosti površine iznosa $Rz\ 45,86\ \mu\text{m}$ te treća klasa odstupanja od okomitosti ili kutnosti, iznosa 0,4014 mm. Rezanjem Al legure s Ar/H_2 mješavinom plinova postignuta je bolja kvaliteta hrapavosti površine reza, dok su u odnosu na uporabu zraka kao plazmenog plina dobivena veća odstupanja od kutnosti. Svi ispitivani uzorci spadaju u drugu klasu hrapavosti površine te četvrtu klasu tolerancije okomitosti ili kutnosti. Optimalna brzina rezanja Al legure s Ar/H_2 mješavinom plinova iznosi 4 m/min, s kojom se postiže druga klasa hrapavosti površine iznosa $Rz\ 28,02\ \mu\text{m}$ te četvrta klasa odstupanja od okomitosti ili kutnosti, iznosa 0,5003 mm.

Predmet daljnjih istraživanja moglo bi biti određivanje kvalitete reza plazme s sekundarnim medijem te njena usporedba s kvalitetama reza dobivenim standardnim plazma rezanjem, obrađenim u ovom diplomskom radu.

5. Literatura

- [1] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [2] I. Stojanović: Plazma rezanje, Seminarski rad na doktorskom studiju, FSB.
- [3] T. Renault, N. Hussary: The life and times of plasma cutting,
<http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/the-life-and-times-of-plasma-cutting>
(01.10.2010.)
- [4] I. Samardžić: Rezanje plazmom – podloge za predavanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [5] C. Brooks: Improvements to CNC plasma technology,
<http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/improvements-to-cnc-plasma-technology> (01.10.2010.)
- [6] H. Simler, V. Krink, F. Laurisch: Suvremena tehnologija rezanja plazmom, Zavarivanje 48 (2005), 1/2, 5 – 12.
- [7] Plasma cutting – The history of plasma cutting,
<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1061> (15.10.2010.)
- [8] T. Whiting: Improving plasma cut quality, The fabricator, 2007.
- [9] S. Kralj, B. Bauer, T. Udiljak, I. Garašić, K. Mihoci: Instalacija CNC sustava za kombinirano rezanje laserom i plazmom, Zbornik radova, HDTZ: Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarivanju i srodnim postupcima, Zadar, 01.-04.06.2005.
- [10] T. Pfeifer: Modern systems of automatic plasma cutting, Zbornik radova, Eurojoin 4: Development of welding and allied process at the beginning of the new millenium, Cavtat – Dubrovnik, 24.-26.05., 2001.

- [11] T. Withing: Starting from scratch,
<http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/starting-from-scratch> (15.10.2010.)
- [12] Welding Handbook, Eight Edition, AWS, 1997.
- [13] V. Panić: Plazma rezanje nehrđajućih čelika, 1. dio, Zavarivanje 52 (2009), 5/6, 173 – 178.
- [14] C. Landry: Elements of plasma arc cut quality,
<http://archive.metalforgingmagazine.com/1998/05/plasma/plasma.htm> (15.10.2010.)
- [15] B. Bauer: podloge za tečaj EWE – Rezanje plazmom, FSB, Zagreb.
- [16] <http://www.millerwelds.com/resources/articles/index?page=articles55.html> (15.10.2010.)
- [17] D. Cook: Illustrated guide to plasma gas selection – How to choose the best gases,
http://www.centricut.com/New_Lessons/lessons_9.html (15.10.2010.)
- [18] V. Panić: Plazma rezanje nehrđajućih čelika, 2. dio, Zavarivanje 53 (2010), 5/6, 171 – 177.
- [19] <http://www.kjellberg.de/Plasma-Cutting/Processes/Plasma-cutting/Used-gases/Gas-properties.html> (10.11.2010.)
- [20] HRN EN ISO 9013: 2003.
- [21] <http://www.spt.se/> (10.11.2010.)
- [22] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [23] C. W. Wegst: Stahlschlüssel, Marbach, 2007.
- [24] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, 4. seminar: Čelici otporni na koroziju, Pula, 2007.
- [25] H. Chandler: Heat treater's guide: practices and procedures for nonferrous alloys, ASM International, 1996.

[26] http://www.fsb.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf

(10.11.2010.)