

Optimizacija parametara tehnološkog procesa za izradu pločastih metalnih proizvoda

Križanić, Vid

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:452863>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vid Križanić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tihomir Opetuk

Student:

Vid Križanić

Zagreb, 2021.

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

Iskreno zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Tihomiru Opetuku i izv. prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na savjetima, uputama i pomoći pri provođenju eksperimenta i izradi ovog rada.

Isto tako zahvaljujem i poduzeću koje mi je omogućilo provedbu eksperimentalnog dijela ovog rada.

Posebno zahvaljujem obitelji, djevojci i prijateljima na podršci.

Vid Križanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VID KRIŽANIĆ**

Mat. br.: 0035196003

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija parametara tehnološkog procesa za izradu pločastih metalnih proizvoda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of the process parameters for the production of plate metal products**

Opis zadatka:

S ciljem povećanja učinkovitosti poslovanja i uvođenja inovativnog procesa u poslovanje poduzeća prvi korak temelji se na analizi parametara procesa obrade metala, analizi povećanja produktivnosti i analizi mogućnosti smanjenja nesukladnih proizvodnih jedinica. Fokus rada bit će na analizi procesa rezanja metalnih komponenti CNC plazmenim lukom. Kod obrade rezanja CNC plazmenim lukom postoje različite varijable (parametri) čijom korekcijom operater može izravno utjecati na kvalitetu reza i konačni rezultat obrade. Ti se parametri mogu podijeliti u dvije skupine:

- Prva skupina - parametri obrade, odnosno veličine koje se mogu mijenjati trenutačno preko upravljačke jedinice stroja, pa čak i za vrijeme obrade, a direktno utječu na ostvarivost reza, kvalitetu rezane površine, potrošnju alata (elektrode) i sl.
- Druga skupina - „hardverske“ varijable, odnosno fizički opipljive module koji sačinjavaju stroj i podložni su kvarovima, a kvalitetom svoje izvedbe utječu na točnost i ekonomičnost (efikasnost) same obrade.

U radu je potrebno analizirati parametre prve skupine znanstveno istraživačkom metodom planiranja i analize pokusa, točnije metodom odzivne površine. Kao ulazne faktore potrebno je uzeti parametre obrade (rezanja) poput brzine posmaka, visine mlaznice i sl., dok za izlazne karakteristike potrebno je uzeti vodeće vrijeme te kvalitetu proizvoda koja se prije svega očituje u dimenzijskoj točnosti i pogrešci pozicioniranja u fazi spajanja. Konačno, optimalno rješenje vezano na parametre obrade omogućit će smanjenje ukupnog vremena izrade, čime se povećava produktivnost i konkurentnost poduzeća.

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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: *Opetuk*
doc. dr. sc. Tihomir Opetuk

Predsjednica Povjerenstva:
Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. REZANJE METALA PLAZMOM.....	2
2.1. Plazma	2
2.2. Tehnologija rezanja plazmom	2
2.3. Suho plazma rezanje bez sekundarnog plina.....	5
2.4. Suho plazma rezanje sa sekundarnim medijem.....	6
2.4.1. Suho plazma rezanje sa sekundarnim plinom	6
2.4.2. Suho plazma rezanje s ubrizgavanjem vode	7
2.4.3. Suho plazma rezanje pod zaštitom vode	9
2.5. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim kovitlajućim plinom	10
2.6. Plazma rezanje s koncentriranim plazmenim mlazom	11
3. PARAMETRI PLAZMA REZANJA.....	12
3.1. Snaga plazmenog luka	12
3.2. Brzina rezanja	12
3.3. Odabir plazmenog plina.....	16
3.3.1. Zrak	16

3.3.2.	Kisik	17
3.3.3.	Dušik	17
3.3.4.	Mješavine argona i vodika	18
3.4.	Odabir sekundarnog plina.....	18
3.5.	Udaljenost sapnice od radnog komada	19
3.6.	Širina i kut zasjeka.....	24
4.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	27
4.1.	O poduzeću	27
4.2.	Lokacija	28
4.3.	Proizvodni program	28
4.4.	CNC plazma rezač	29
5.	EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	36
5.1.	Određivanje zasjeka i preciznosti osi stroja	36
5.2.	Izrezivani materijali	37
5.2.1.	Konstruktivski čelik S235JRG2	38
5.2.2.	Aluminij AlMg3	38
5.2.3.	Nehrđajući čelik X5CrNiMo17-12-2	40
5.3.	Parametri rezanja	41
5.4.	Plan pokusa.....	45
5.5.	Rezultati eksperimenta	51
5.6.	Obrada rezultata i opažanja	59
5.6.1.	Regresijske jednadžbe	59
5.6.2.	Odstupanja po x osi stroja	60
5.6.3.	Odstupanja po y osi stroja	64
5.6.4.	Prosječno odstupanje promjera provrta.....	66
5.6.5.	Analiza optimalnih iznosa zasjeka	70

6. ZAKLJUČAK	71
LITERATURA.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prenešeni i neprenešeni plazmeni luk prilikom rezanja [4]	3
Slika 2.	Poprečni presjek gorionika za plazma rezanje [7]	4
Slika 3.	Suho plazma rezanje bez sekundarnog plina [2].....	6
Slika 4.	Suho plazma rezanje sa sekundarnim plinom [2]	7
Slika 5.	Plazma rezanje s ubrizgavanjem vode [10]	8
Slika 6.	Plazma rezanje pod zaštitom vode [10]	9
Slika 7.	Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim kovitlajućim plinom [2].....	10
Slika 8.	Plazma rezanje s koncentriranim plazmenim mlazom [12].....	11
Slika 9.	Akumulacija troske s donje strane izrezanog komada uslijed premale brzine	13
Slika 10.	Povlačenje plazmenog luka [3].....	14
Slika 11.	Troska s gornje strane obratka	14
Slika 12.	Nepotpuno rezanje materijala	15
Slika 13.	Ovisnost brzine o debljini rezanog materijala [2].....	15
Slika 14.	Odnosi visina gorionika/sapnice prilikom probijanja i rezanja [3].....	19
Slika 15.	Povećanje ulazne putanje u programu FastNEST	20
Slika 16.	Iniciranje rezanja na rubu ploče	21
Slika 17.	Djelomično potrošena elektroda (lijevo) i nova elektroda (desno).....	22
Slika 18.	Održavanje konstantne visine rezanja povećanjem napona [3]	23
Slika 19.	Uništena elektroda i sapnica	23
Slika 20.	Kut zasjeka pri plazma rezanju zrakom [16]	24
Slika 21.	Utjecaj udaljenosti sapnice na kut zasjeka [3]	25
Slika 22.	Ovisnost kuta zasjeka o brzini rezanja za plazma rezanje zrakom [16]	26
Slika 23.	Proizvodna hala poduzeća Medved Metali u Čičkoj Poljani	27
Slika 24.	CNC plazma stroj u maloj hali poduzeća Medved Metali	29
Slika 25.	Vodilica i klizači CNC plazma stroja	30
Slika 26.	Klizač HIWIN HGH25CA Z0H [18].....	30
Slika 27.	Vertikalni podizač CNC plazma stoja bez zaštitne limene maske.....	31
Slika 28.	Računalna jedinica CNC plazma stroja	32
Slika 29.	Napajanje Hypertherm Powermax45	32
Slika 30.	Priprema za odvajanje vlage iz zraka.....	33

Slika 31.	Dijelovi gorionika Hypertherm T45m [21].....	34
Slika 32.	Sadržaj rukavca gorionika Hypertherm T45m.....	34
Slika 33.	Potrošni dijelovi vrha gorionika Hypertherm T45m.....	35
Slika 34.	Putanja gorionika u odnosu na iznos zasjeka.....	37
Slika 35.	Prikaz ispitnog uzorka s ucrtanim dimenzijama	46
Slika 36.	Izrezani i obrušeni ispitni uzorci.....	52
Slika 37.	Pomična mjerka proizvođača Meba preciznosti 0,02 mm	52
Slika 38.	Odstupanja po x osi stroja za konstrukcijski čelik.....	61
Slika 39.	Odstupanja po x osi stroja za aluminij.....	62
Slika 40.	Odstupanja po x osi stroja za nehrđajući čelik.....	63
Slika 41.	Odstupanja po y osi stroja za konstrukcijski čelik.....	64
Slika 42.	Odstupanja po y osi stroja za aluminij.....	65
Slika 43.	Odstupanja po y osi stroja za nehrđajući čelik.....	66
Slika 44.	Prosječno odstupanje promjera za konstrukcijski čelik	67
Slika 45.	Prosječno odstupanje promjera za aluminij	68
Slika 46.	Prosječno odstupanje promjera za nehrđajući čelik.....	69

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Razvoj tehnologije plazma rezanja [6].....	3
Tablica 2.	Plazmeni i sekundarni plinovi za različite materijale [8].....	18
Tablica 3.	Mehanička svojstva čelika S235JRG2 [1]	38
Tablica 4.	Kemijski sastav legure AlMg3 [1]	39
Tablica 5.	Mehanička svojstva legure AlMg3 [1].....	39
Tablica 6.	Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2 [1].....	40
Tablica 7.	Preporučene brzine rezanja niskolegiranog čelika za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21].....	41
Tablica 8.	Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za konstrukcijski čelik za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21].....	42
Tablica 9.	Preporučene brzine rezanja aluminija za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]	42
Tablica 10.	Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za aluminij za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21].....	43
Tablica 11.	Preporučene brzine rezanja nehrđajućeg čelika za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21].....	44
Tablica 12.	Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za nehrđajući čelik za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21].....	45
Tablica 13.	Plan provođenja izrezivanja ispitnih uzoraka.....	48
Tablica 14.	Rezultati eksperimenta	53
Tablica 15.	Izračunani optimalni iznosi zasjeka	70

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_{mt}	N/mm^2	Tlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	Savojna čvrstoća
R_{mu}	N/mm^2	Smična čvrstoća
R_{eH}	N/mm^2	Gornja granica tečenja
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Granica razvlačenja (konvencionalna)
A_5	%	Istezanje
d	mm	Debljina materijala
KV	J	Udarni rad loma, uzorak sa V – utorom
KU	J	Udarni rad loma, uzorak sa U – utorom
HB	N/mm^2	Tvrdoća po Brinellu
Δx	mm	odstupanje po osi x
Δy	mm	odstupanje po osi y
$\Delta \emptyset$	mm	odstupanje promjera

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AC	<i>Alternating Current</i> – izmjenična struja
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – računalno numeričko upravljanje
DC	<i>Direct Current</i> – istosmjerna struja
DWG	AutoCAD Drawing datoteka
EN	<i>Europäische Norm</i> – europska norma
HRN	Hrvatska norma
MAG	<i>Metal Active Gas</i> – varenje s aktivnim zaštitnim plinom
NC	<i>Numerical Control</i> – numeričko upravljanje
PVC	Polivinilov klorid
VDC	<i>Volts of Direct Current</i> – volta istosmjerne struje

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je tema određivanja zasjeka i ispitivanja točnosti osi CNC plazma rezača kod izrezivanja pločevina konstrukcijskog čelika, aluminija i nehrđajućeg čelika debljina 2, 4 i 6 mm.

U uvodnom dijelu objašnjena je plazma kao agregatno stanje i tehnologija plazma izrezivanja. Opisani su njeni napretci i razvoj kroz povijest, područja primjene i različite varijante plazma izrezivanja koje su korištene nekoć i koje se primjenjuju i danas. Potom je objašnjen utjecaj različitih parametara koji određuju način provođenja izrezivanja i analizirani su utjecaji različitih primarnih plinova koji se koriste za formiranje plazmenog mlaza i sekundarnih plinova koji štite formirani plazmeni mlaz.

U eksperimentalnom dijelu rada je opisano poduzeće u kojemu se nalazi CNC plazma stroj na kojem se provodio eksperiment, zatim su navedeni materijali koji se izrezuju i njihova svojstva, te parametri koji su korišteni za izrezivanje. Nakon opisivanja materijala, dan je detaljan plan pokusa kreiran u programskom paketu *Design – Expert* po kojem su se provodila izrezivanja ispitnih uzoraka. Po završetku rezanja, svi ispitni uzorci su izmjereni, te su podaci o odstupanjima njihovih dimenzija po x i y osi i odstupanja promjera provrta tablično prikazani i analizirani programskim paketom *Design – Expert*. Provedena je statistička analiza izmjerenih podataka da bi se na temelju odstupanja dimenzija ispitnih uzoraka utvrdile optimalne vrijednosti zasjeka i jednadžbe koje opisuju dimenzijska odstupanja za svaki materijal i debljinu. Uz iznose zasjeka, analizom je dobiven i uvid u točnost x i y osi stroja.

Ključne riječi: plazma, rezanje, zasjek, odstupanje, točnost, analiza, čelik, aluminij

SUMMARY

This paper processes the topic of determining the kerf value and axis accuracy of a CNC plasma cutter for the cutting of 2, 4 and 6 mm thick plates of construction steel, aluminum and stainless steel.

Introductory part explains plasma as a physical state and the technology of plasma cutting. Its development throughout history, fields of application and different variants of plasma cutting which were used in the past, and which are still being used today, were described. Influence of different parameters which determine how the process will be implemented is explained, along with how do the different gases, which are used to form the plasma jet, and secondary gases, which protect the formed plasma jet, influence the process.

Experimental part of the paper describes the firm which houses the CNC plasma cutting machine on which the experiment was performed, afterwards, the materials which are being cut are listed along with their properties and parameters used for the cutting process. After the materials were listed, a detailed plan of the experiment by which the cutting will be performed, created in the *Design – Expert* software, was given. Upon completion of the cutting, all test samples were measured, and the data regarding their dimensional deviations on x and y axis and hole diameter deviations was tabularly shown and analyzed with the *Design – Expert* software. Statistical analysis of the measured data was made so that the optimal kerf values and the equations which describe dimensional deviations for each material and thickness could be made, based on the dimensional deviation of the test samples. Along with the kerf values, analysis has also given insight in the accuracy of the x and y axis of the machine.

Keywords: plasma, cutting, kerf, deviation, accuracy, analysis, steel, aluminum

1. UVOD

Metal se kao materijal u industriji koristi već dugi niz godina te je kao takav bio primaran fokus za razvijanje novih tehnologija obrade. Proizvodnja je danas nezamisliva bez čelika, koji je tijekom godina primjene postao najvažniji tehnički materijal. Proizvodnja čelika u svijetu iznosi preko 900 milijuna tona godišnje, što premašuje ukupnu proizvodnju svih ostalih tehničkih materijala za čak 50%, odnosno masa godišnje proizvedenog čelika je 10 puta veća od mase svih ostalih proizvedenih metala i njihovih legura [1]. Aluminij, iako se primjenjuje u industriji kraće i u manjoj mjeri od čelika, i dalje je nezamjenjiv u avioindustriji, autoindustriji, elektrotehnici, graditeljstvu i drugdje. Neka od svojstava koja ga ističu među drugim metalima su dobar omjer čvrstoće i gustoće, najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće među svim metalima i relativno velika korozivna postojanost [1].

Oba navedena metala mogu se obrađivati konvencionalnim metodama obrade: ručno, klasičnim strojevima ili CNC (engl. *Computer Numerical Control*) alatnim strojevima – tokarenjem, glodanjem, rezanjem, bušenjem i sl. Ako se fokus stavi na obradu metala rezanjem, u današnje vrijeme kada je konkurencija velika, a uz brzinu se iziskuje i kvaliteta, najlogičniji odabir obrade bilo bi rezanje laserom, vodenim mlazom ili plazmenim lukom. Sve tri navedene metode karakterizira brzina, ekonomičnost i točnost, a svaka od njih ima određene prednosti i nedostatke, stoga njihova primjena u konačnici najviše ovisi o proizvodnom programu, potrebama i mogućnostima poduzeća koje planira nabaviti takvu vrstu stroja.

U ovom diplomskom radu proučavani su faktori koji utječu na kvalitetu reza kod CNC plazma rezanja te se eksperimentalno utvrđivao utjecaj zadane širine zasljeska u upravljačkoj jedinici na dimenzijsku točnost kod plazma rezanja limova od konstrukcijskog i nehrđajućeg čelika i aluminija različitih debljina.

2. REZANJE METALA PLAZMOM

2.1. Plazma

Plazma je po definiciji četvrto agregatno stanje uz kruto, tekuće i plinovito. To je električki vodljiv, električki neutralan (broj pozitivnih iona jednak je broju negativnih iona), visokoionizirani plin. Da bi se plazmeni mlaz ostvario, potrebno je određeni plin (primjerice zrak ili dušik) u stlačenom stanju pustiti kroz električni luk. Električni luk uspostavlja se između elektrode spojene na negativan pol i radnog komada (metalnog lima, profila ili cijevi) koji su spojeni na pozitivan pol [2].

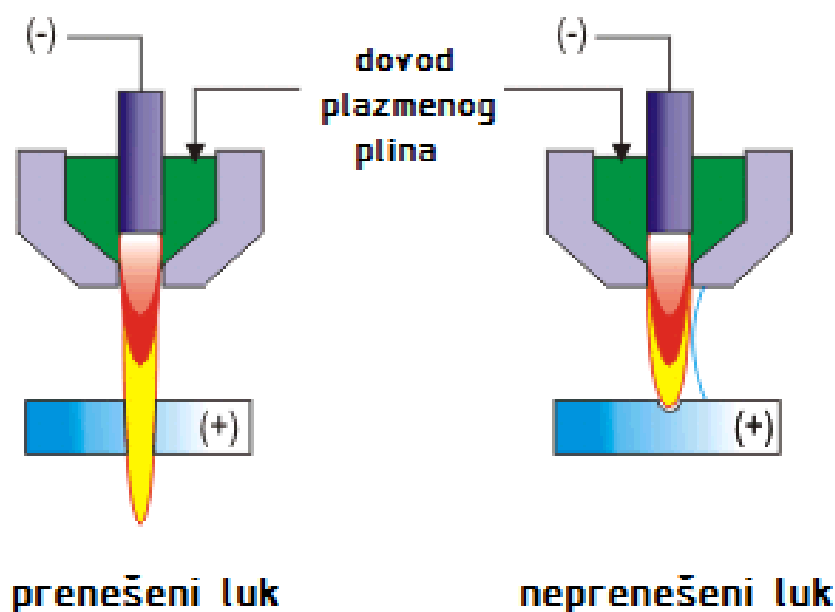
2.2. Tehnologija rezanja plazmom

Rezanje plazmom datira iz sredine dvadesetog stoljeća. U početku je plin za stvaranje plazmenog luka bila mješavina dušika i argona, što je financijski bilo vrlo skupo i neisplativo. Daljnjim otkrićima na području plazme počeo se primjenjivati dušik kao glavni plin za rezanje, uz dodavanje sekundarnog plina koji se birao prema vrsti rezanog metala (zrak, kisik i ugljični dioksid za čelike i mješavina argona i vodika za aluminijski). Razvojem tehnologije rezanja poboljšala se kvaliteta reza, trajnost elektrode i postalo je moguće rezati veće debljine materijala. Otkriće tehnologije rezanja plazmom pod vodom sa sobom je donijelo i prednosti nad konvencionalnim rezanjem, kao što su veća struja rezanja i značajno uklanjanje buke, bljeska i dima koji nastaju kod uobičajenog procesa rezanja [2].

Gorionik plazma rezača danas je dizajniran tako da je omogućen protok raznih plinova, rashladnih sredstava, vode (ako se koristi) i električne struje bez da se oni međusobno ometaju. U modernim se sustavima za plazma rezanje unutar gorionika uz cijevi za dovod plinova nalaze i potrošni dijelovi – elektroda, sapnica, prsten kovitlanja i (opcionalno) zaštitni čep. Elektrode za plazma rezanje imaju vrh izrađen od volframa koji se postepeno troši prilikom rezanja, dok se u slučaju rezanja kisikom umjesto volframa primjenjuje hafnij [3].

Plazma rezanje danas se može vršiti ručno ili na CNC stroju, sa ili bez korištenja sekundarnog plina, pod vodom ili „na suho“. Plazmeni luk prilikom rezanja može biti prenešen (struja teče od elektrode u gorioniku (katoda) prema radnom komadu (anoda)) ili neprenešen (struja teče od između elektrode i sapnice u gorioniku), što je prikazano na slici 1 [4]. Luk karakterizira visoka gustoća i mogućnost postizanja temperatura koje se kreću u rasponu od 20 000 do 40 000 °C.

Rezanjem pomoću plazmenog prenešenog luka je tako moguće taljenjem rezati sve metale, ali i neke nemetale, kao što su primjerice polimeri, u slučaju da se koristi nepreneseni luk. Brzine rezanja mogu biti i do 8 m/min za tanje čelične i aluminijske limove ili cijevi, a brzina opada porastom debljine rezanog materijala. Brzina rezanja također ovisi i o izvoru napajanja, odnosno o jačini struje koja se koristi za rezanje [5]. U tablici 1 prikazan je razvoj tehnologije plazma rezanja kroz godine i parametri i značajke tehnologije koji su prevladavali za taj period.



Slika 1. Prenešeni i neprenešeni plazmeni luk prilikom rezanja [4]

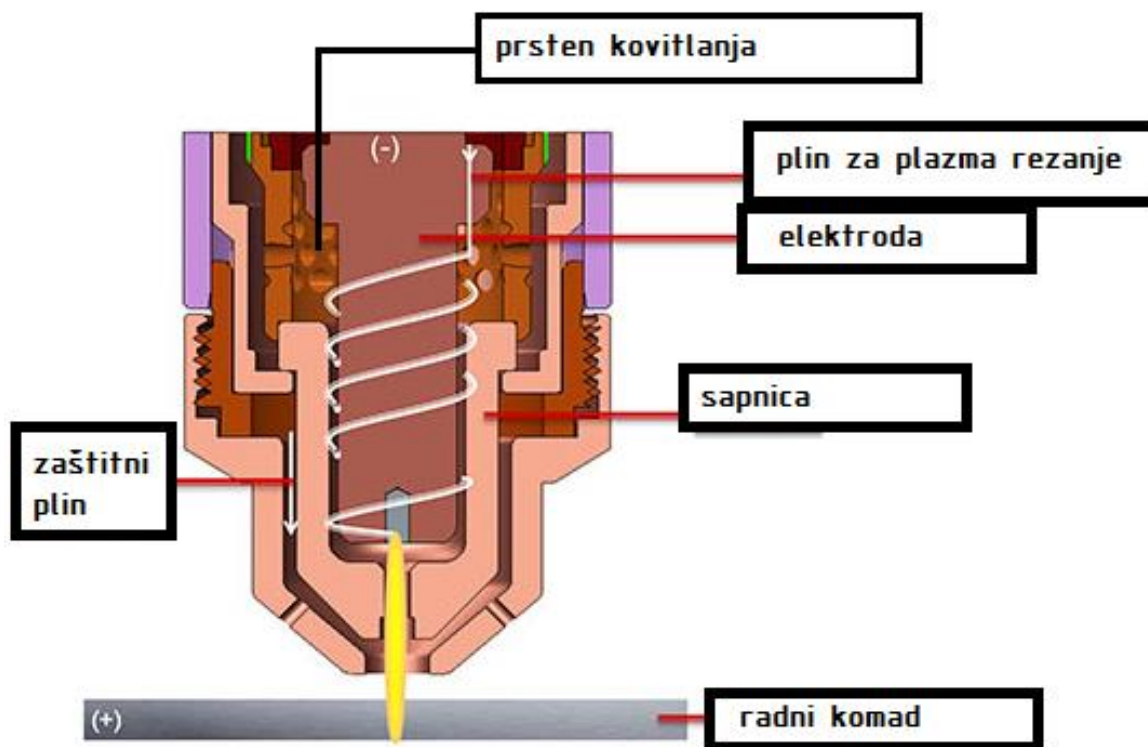
Tablica 1. Razvoj tehnologije plazma rezanja [6]

Godina	Debljina [mm]	Struja [A]	Plazmeni plin	Zaštitni fluid	Brzina rezanja [mm/min]
1957.	12,7	250	Dušik	Bez	890
1965.	12,7	270	Dušik	Bez	1016
1976.	12,7	350	Dušik, vodik	Voda	2286
2006.	12,7	150	Kisik	Zrak	2540
1965.	25,4	1100	Dušik, vodik	Bez	2540
1976.	25,4	575	Dušik	Voda	1524
2006.	25,4	300	Kisik	Zrak	1778
2018.	25,4	400	Kisik	Zrak	2032

Plazmom se tako mogu vršiti operacije [2]:

1. rezanja,
2. zavarivanja,
3. navarivanja,
4. žljebljenja,
5. naštrcavanja,
6. zagrijavanja,
7. površinskog tretiranja materijala,
8. modificiranja površine materijala,
9. spaljivanja i razaranja materijala.

Iniciranje procesa plazma rezanja započinje se u gorioniku koji je prikazan na slici 2, gdje se nakon davanja početnog signala (prekidačem na gorioniku ili preko upravljačke jedinice) plin pod tlakom dovodi na vrh gorionika. Pri njegovom vrhu, na mjestu gdje završava crijevo za dovod plina, nalaze se elektroda, sapnica i prsten kovitlanja. U ponekim izvedbama cijeli vrh još može biti pokriven zaštitnim čepom ili štitom koji pomaže pri fokusiranju plazmenog mlaza, ali i štiti sapnicu i elektrodu od kapljica rastaljenog metala [7].



Slika 2. Poprečni presjek gorionika za plazma rezanje [7]

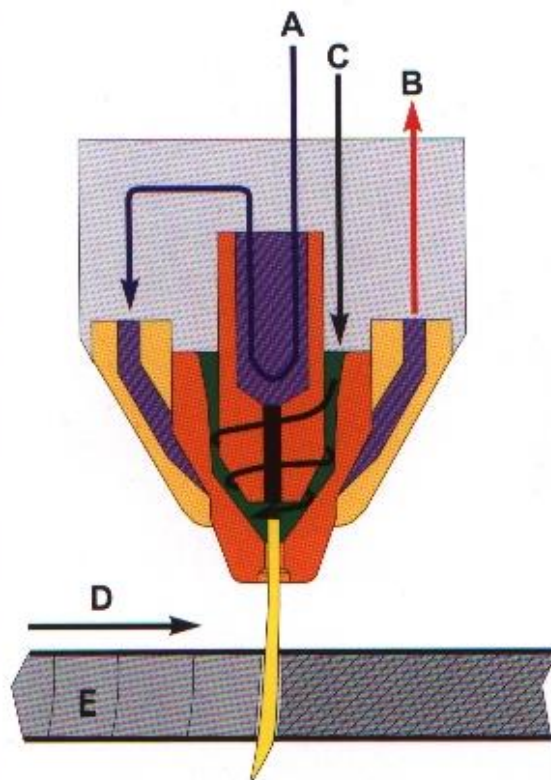
Plin pod tlakom kroz cijev dolazi do prstena kovitlanja gdje dobiva svoju rotaciju koja ga usmjerava oko elektrode. Sapnica se privremeno podvrgava pozitivnom naponu, dok se elektroda podvrgava negativnom, stoga je važno napomenuti da su elektroda i sapnica međusobno odvojene, inače proces ne bi bio ostvariv. Inicijalni plazmeni luk (također nazivan i „pilot luk“) nastaje kada iskra visoke frekvencije između elektrode i sapnice prouzroči ionizaciju plina koji tada postaje električki vodljiv. Nakon što pilot plazmeni luk ostvari dodir s radnim komadom (koji je preko stola alatnog stroja povezan s uzemljenjem), strujni krug pilot luka postaje otvoren i protok struje preusmjerava se sa elektrode na radni komad. Izvor napajanja zatim podiže jačinu istosmjernje struje tako da ona odgovara iznosu definiranom od strane operatera i stabilizira plazmeni luk za materijal koji se reže. U ovome trenutku postoji mogućnost primjene i sekundarnoga plina koji teče s vanjske strane sapnice kroz zaštitni čep. Promjeri otvora na sapnici i zaštitnom čepu dodatno usmjeravaju plazmeni luk i fokusiraju ga da bi se dobio tanji i čišći rez. Električna energija u plazmenom luku svojom toplinom otapa materijal, dok ga plin pod tlakom odstranjuje izvan reza [7].

Iako postoje različite podjele ovisno o gledištu, moderni postupci rezanja plazmom mogu se općenito podijeliti na [8]:

1. suho plazma rezanje (u atmosferskim uvjetima) bez sekundarnog plina,
2. suho plazma rezanje sa sekundarnim medijem,
3. podvodno plazma rezanje sa sekundarnim kovitlajućim plinom,
4. plazma rezanje s koncentriranim plazmenim mlazom.

2.3. Suho plazma rezanje bez sekundarnog plina

Standardno (suho) rezanje plazmom bez sekundarnog plina, prikazano na slici 3, može se koristiti kod ručnog ili CNC rezanja i žljebljenja, za manji broj rezanih komada i bez prevelikih zahtjeva na kvalitetu samoga reza. Primjenjuje se u pojedinačnoj, maloserijskoj, a ponekad i velikoserijskoj pripremi materijala za daljnju obradu (primjerice zavarivanjem). Čeličane koriste ovu tehnologiju kod robotiziranog odrezivanja cijevi i profila te za obrađivanje rubova tabli lima prije pakiranja. Plin koji se koristi za proizvodnju plazmenog luka i istovremeno hlađenje elektrode i sapnice najčešće je zrak, a osim zraka može se primjenjivati i dušik ili kisik. Materijali koji se režu ovom metodom debljine su do 16 mm, a primjenjivane struje jakosti su do 100 A [5].

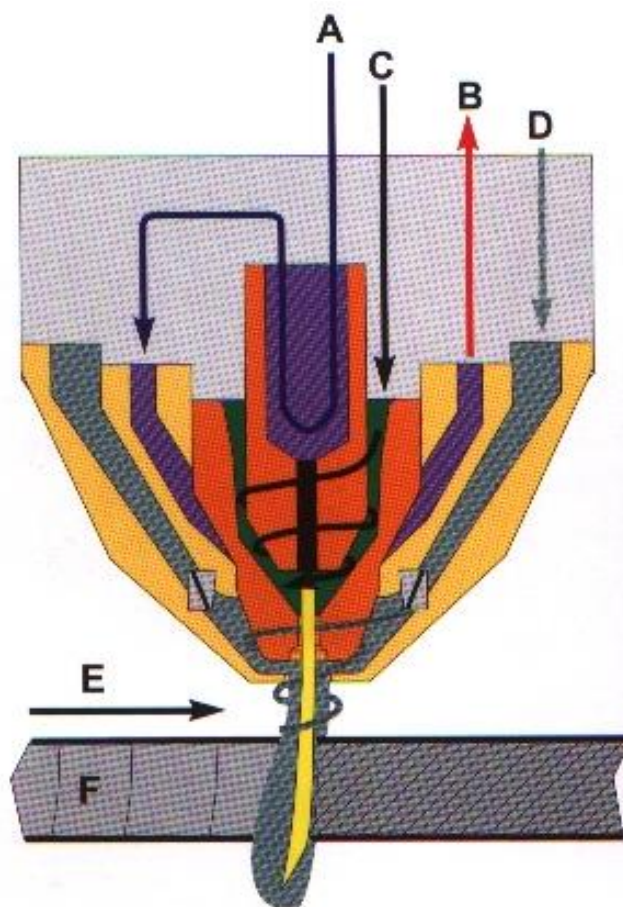


Slika 3. Suho plazma rezanje bez sekundarnog plina [2]
(a) dovod vode, b) odvod vode, c) plazmeni plin, d) smjer rezanja, e) rub reza)

2.4. Suho plazma rezanje sa sekundarnim medijem

2.4.1. Suho plazma rezanje sa sekundarnim plinom

Kada se iziskuje visoka kvaliteta reza (posebice kod Cr-Ni čelika i aluminija), ili se pri obradi očekuje učestalo bušenje radnog komada, preporuča se metoda rezanja sa sekundarnim plinom kako je prikazano na slici 4. Sekundarni plin koji se kovitla oko plina za proizvodnju plazmenog luka štiti sapnicu od kapljica rastaljenog metala, ali i sprječava interakciju zraka iz okoline s plazmenim lukom i rastaljenim metalom u zoni rezanja. Kisik iz okoline posebice može reagirati s rastaljenim metalom prilikom rezanja visokolegiranog čelika, stoga je nakon rezanja potrebna završna obrada skidanja sloja oksida ako se ne koristi sekundarni zaštitni plin. Suhim rezanjem sa sekundarnim kovitlajućim fluidom mogu se rezati metali debljine do 180 mm, pri čemu se koriste struje jakosti 600 A [5].



Slika 4. Suho plazma rezanje sa sekundarnim plinom [2]

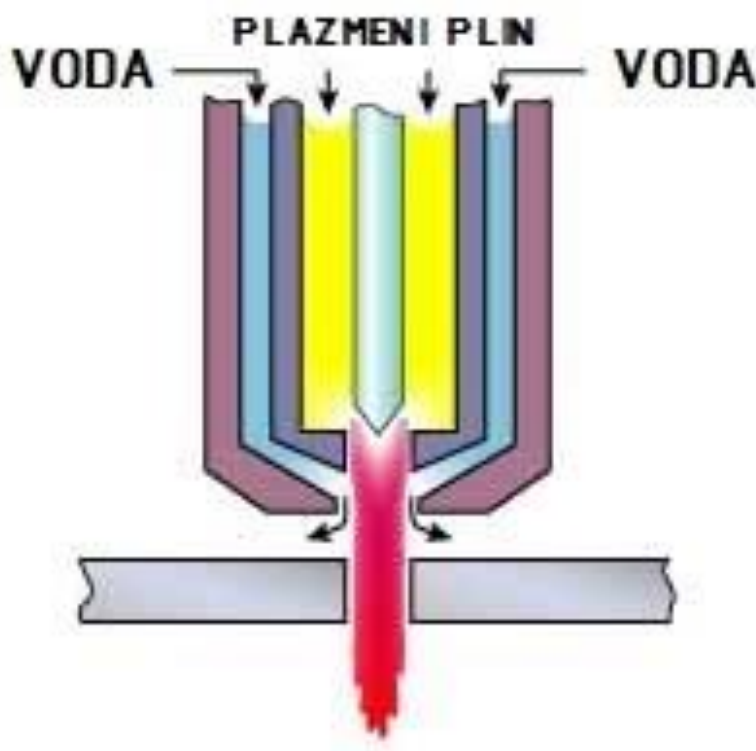
(a) dovod vode, b) odvod vode, c) plazmeni plin, d) sekundarni plin, e) smjer rezanja, f) rub reza)

2.4.2. Suho plazma rezanje s ubrizgavanjem vode

Inicijalna ideja korištenja vode u svrhu poboljšanja reznih karakteristika plazmenog mlaza nastala je još 1965. godine kada se voda pokušala koristiti umjesto sekundarnog plina. Princip rada isti je kao i kod korištenja sekundarnog plina, a poboljšanja u odnosu na korištenje plina bila su primjetna u izgledu reza i produljenju životnog vijeka elektrode zbog rashladnih svojstava vode. Obzirom da voda u ovom slučaju nije pomogla u suženju, odnosno fokusiranju plazmenoga mlaza, nije bilo poboljšanja u odnosu na sekundarni plin na području ravnosti reza, brzine rezanja i smanjenja nakupljanja troske na radnom komadu [4].

Na slici 5 je prikazano plazma rezanje s radijalnim jednolikim ubrizgavanjem vode kroz sapnicu na plazmeni mlaz. Ovom metodom rezanja dobiveno je puno bolje suženje plazmenog mlaza, nego što bi bakrena sapnica sama mogla postići. Ubrizgavanjem vode formira se svojevrsni

izolacijski granični sloj vodene pare između plazmenog mlaza i mlaza tekuće vode koja nije isparila. Ovaj zaštitni sloj omogućio je izradu posebne sapnice, koja je imala cijeli donji dio od keramike. Korištenje keramike u sapnici dovelo je do produžetka njenog radnog vijeka jer je eliminiran najveći uzročnik propadanja sapnice – formiranje dvostrukog električnog luka. Dvostruki je luk pojava koja se može javiti kod premalog ili prevelikog protoka plina, premalih brzina rezanja, predugog čekanja na početak rezanja nakon probijanja materijala, nepravilnog formiranja pilot plazmenog luka ili nepravilnog pozicioniranja gorionika iznad radnog komada, zbog čega sapnica ostaje u strujnom krugu i za vrijeme plazma rezanja [9].

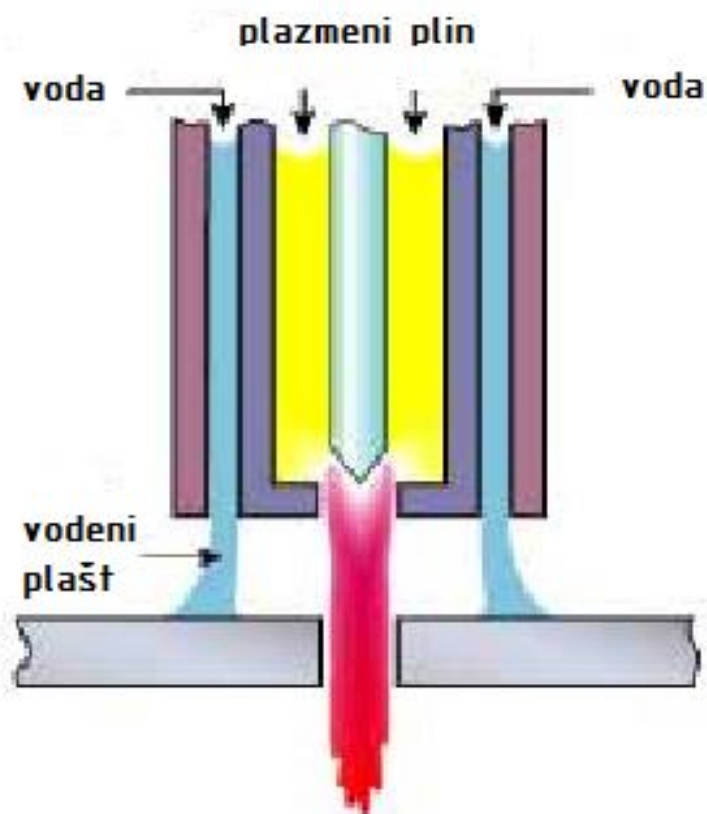


Slika 5. Plazma rezanje s ubrizgavanjem vode [10]

Uz produljenje životnog vijeka sapnice, zabilježena su i poboljšanja u reznim karakteristikama kao što su kvaliteta i bolja pravokutnost reza na svim metalnim materijalima, veće ostvarive brzine rezanja, veća gustoća plazmenog mlaza i više temperature rezanja (čak i do 30 000 °C) zbog rashladnih i izolacijskih svojstava vode. Uz sve navedeno, ustanovljeno je da se kod prakticiranja metode ubrizgavanja vode optimalna rezna svojstva za sve materijale ostvaruju korištenjem samo jednog plina za formiranje plazmenog mlaza – dušika, što je povećalo ekonomičnost postupka [4].

2.4.3. Suho plazma rezanje pod zaštitom vode

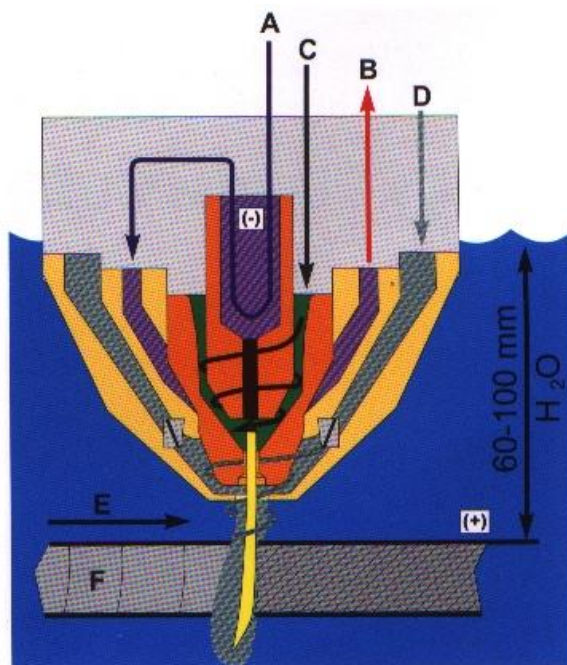
Obzirom da plazmeni mlaz razvija izuzetno visoke temperature, prilikom rezanja metala u radni se prostor, osim buke, oslobađaju i velike količine metalne prašine, dima, plinova i ultraljubičastog zračenja koji su štetni za operatera. Na slici 6 prikazana je tehnologija rezanja pod zaštitnim vodenim plaštom koja je razvijena upravo s ciljem ublažavanja tih nedostataka. Vodeni se plašt ostvaruje ubrizgavanjem vode oko plazmenog mlaza i služi kao štit koji sprječava štetne plinove i čestice da se oslobode iz zone rezanja, a pomaže i kod smanjenja buke, bljeska plazmenog mlaza i ultraljubičastog zračenja. Ovakav oblik rezanja može biti i u kombinaciji s vodenim stolom na kojemu se nalazi radni komad. Iako radni komad ne mora biti potopljen u vodi, konstrukcija vodenog stola ispunjena je vodom, stoga se na taj način uklanjaju štetni plinovi, buka i dim koji se inače oslobađaju ispod radnog komada [4].



Slika 6. Plazma rezanje pod zaštitom vode [10]

2.5. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim kovitlajućim plinom

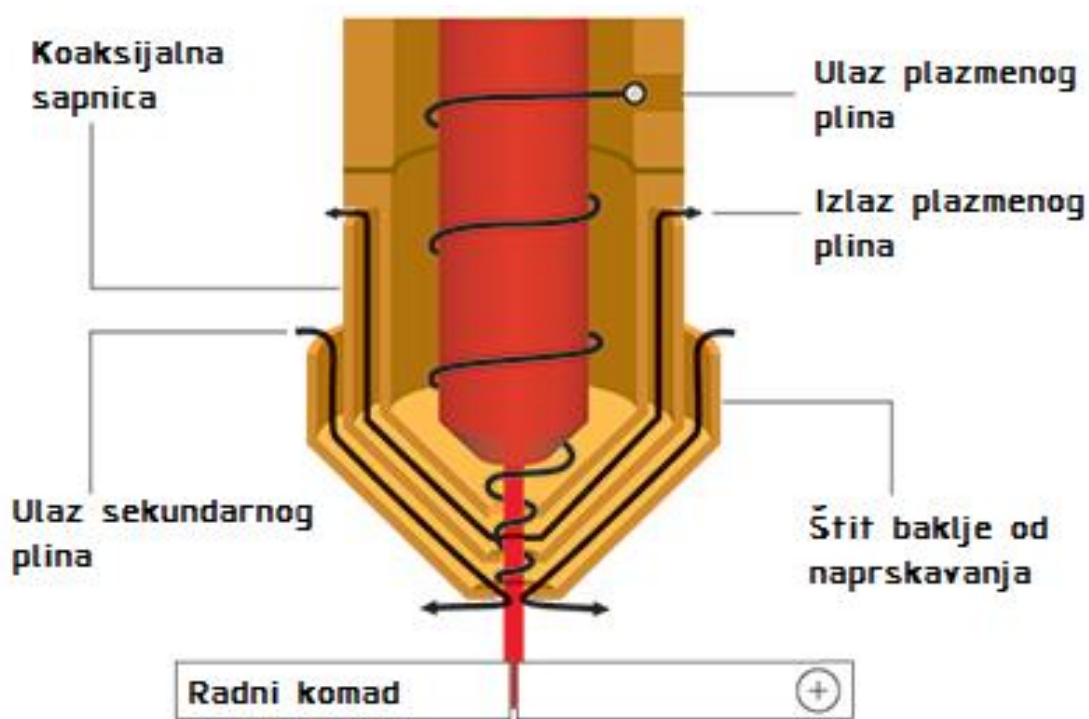
Na slici 7 prikazan je postupak podvodnog plazma rezanja sa sekundarnim plinom koji ima značajne prednosti u pogledu smanjenja buke, prašine, ultraljubičastog zračenja plazmenog luka i deformacije radnih komada zbog manjeg unosa topline u područje reza. Radni komad uronjen je 60 – 100 mm u vodu, a uz njega, i sapnica se za vrijeme rezanja konstantno nalazi ispod površine vode. Loše strane podvodnog rezanja podrazumijevaju veći utrošak energije u odnosu na suho rezanje – konkretno, za rezanje materijala debljine 100 mm potrebno je primjeniti struju jakosti 750 A, smanjenu maksimalnu debljinu rezanja i mogućnost nadziranja procesa rezanja (radni komad nije izravno vidljiv obzirom da se nalazi uronjen u vodu), brzine rezanja koje su 10 – 20% manje, veće inicijalne troškove instalacije (potreban stol, odnosno kada, koja se može napuniti vodom) i veće troškove održavanja. Još jedna opasnost koja se dovodi u vezu s podvodnim plazma rezanjem je razdvajanje molekula vode u zoni rezanja na kisik i vodik, pri čemu se kisik spaja na rastaljeni metal, a slobodan vodik spaja se s ostalim molekulama vodika. Spajanje više molekula vodika dovodi do formiranja džepova vodika u plinovitom stanju koji mogu proizvesti manje eksplozije ako se zapale plazmenim lukom. Kontinuirano uzburkavanje i strujanje vode može donekle pomoći u preveniranju ovog problema [4].



Slika 7. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim kovitlajućim plinom [2]
(a) dovod vode, b) odvod vode, c) plazmeni plin, d) sekundarni plin, e) smjer rezanja, f) rub reza)

2.6. Plazma rezanje s koncentriranim plazmenim mlazom

Sustavi koji koriste koncentrirani plazmeni mlaz, prikazan na slici 8, fokusiraju više energije u manjem području, a karakterizira ih precizniji rez, smanjena brzina rezanja, smanjeni zasjek, oštriji bridovi u zoni reza i manja kosina reza. Da bi ove karakteristike bile ostvarive, primjenjuje se sekundarni plin u kombinaciji s preciznom koaksijalnom sapnicom posebne izvedbe. Koaksijalna sapnica ističe se dvjema značajkama – sadrži dodatne kanale za ispust jednog dijela plazmenog plina koji dodatno sudjeluje u stabilizaciji i fokusiranju plazmenog mlaza i ima smanjeni promjer otvora. Dok su prvotne sapnice imale otvore promjera od oko 4,8 mm, danas je moguće proizvesti sapnicu s otvorom promjera 1 do 1,14 mm. Povećana gustoća plazmenog mlaza, odnosno fokusiranje veće količine energije na manjem području, povećava temperature na sapnici i elektrodi, stoga je uz napretke na području izrade sapnica, bilo potrebno poboljšati kvalitetu izrade elektrode i povećati protok rashladne tekućine da bi se produžio njihov životni vijek.



Slika 8. Plazma rezanje s koncentriranim plazmenim mlazom [12]

Ova tehnologija pogodna je za rezanje materijala do 12 mm debljine i pruža jeftiniju alternativu laserskom rezanju metala. Preciznost i pravokutnost reza bolja je nego kod konvencionalnog plazma rezanja, ali je nešto lošija u odnosu na lasersko rezanje, s time da valja napomenuti da lasersko rezanje ima znatno veću brzinu rezanja (60-80%) od koncentrirane plazme [6, 11].

3. PARAMETRI PLAZMA REZANJA

Na ostvarivost i kvalitetu rezanja plazmenim mlazom utječu brojni parametri, a kao najbitnije valja izdvojiti [2]:

1. snagu plazmenog luka,
2. brzinu rezanja,
3. odabir plazmenog plina,
4. odabir sekundarnog plina (ako se koristi),
5. udaljenost sapnice od radnog komada,
6. zasjek i kut reza.

3.1. Snaga plazmenog luka

Snaga plazmenog luka proizlazi iz napajanja, odnosno iz uređaja koji služi za pretvaranje izmjenične AC (engl. *Alternating Current*) struje (monofazne ili trofazne) u istosmjernu DC (engl. *Direct Current*) struju konstantnog napona koji najčešće varira između 200 i 400 VDC (ovisno o postavkama unesenim od strane operatera), iako ti iznosi mogu biti i manji od 200, odnosno veći od 400 VDC. Operater na napajanju također određuje jačinu električne struje koja mu je potrebna za vršenje rezanja, tako da za tanje materijale može tražiti manju električnu struju od izvora, odnosno veću za rezanje debljih materijala [7]. Izvori struje uvelike variraju u snazi, odnosno jačini struje koju mogu koristiti za stvaranje plazmenog luka. Tako postoje, primjerice, manja napajanja snage 6,5 kW koja su predviđena za rezanje mekših čelika i aluminijskih materijala manjih debljina (do oko 15 mm) sa strujom od 10 do 45 A, ali i veća napajanja koja raspolažu snagom većom od 66,5 kW i mogu rezati i nehrđajuće čelike debljine 75 mm sa strujom od čak 300 A [13].

3.2. Brzina rezanja

Cilj je svake obrade postizanje što bolje kvalitete konačnog proizvoda, uz maksimalnu proizvodnost. Ako se radi o plazma rezanju, valja voditi računa o višestrukim faktorima kao što su:

1. postizanje maksimalnog mogućeg životnog vijeka potrošnih dijelova (elektrodi i sapnica),
2. minimalna količina troske na obratku,

3. minimalna naknadna obrada izrezanog komada,
4. minimalna ostvariva širina zasjeka,
5. postizanje dimenzijske i geometrijske točnosti izrezanog komada.

Brzina rezanja izravno utječe na sve navedene faktore, odnosno, kako se mijenja iznos brzine rezanja, tako se mijenja i širina zasjeka, količina troske, životni vijek potrošnih dijelova i dr. Proizvođač napajanja najčešće prilaže podatke za svaki pojedini model napajanja s preporučenim iznosima struje, napona i brzine rezanja u ovisnosti o materijalu koji se reže i njegovoj debljini, iako operater te vrijednosti može dodatno korigirati prema vlastitom iskustvu – odnosno, preporučene vrijednosti mogu se povećati ili smanjiti obzirom na potrošenost elektrode i sapnice, razinu vlage i temperaturu prostorije unutar koje se vrši rezanje, stanje površine materijala koji se reže (ima li nečistoća i/ili korozije na njoj) i dr.

Prilikom plazma rezanja, poželjno je vršiti obradu pri što većoj brzini, ali pritom vodeći računa da ta brzina ne kompromitira konačnu kvalitetu odrezanog komada. Smanjena brzina rezanja uzrokuje povećanu količinu troske s donje strane obratka, prikazano na slici 9, što dovodi do povećane potrebe za naknadnom obradom odrezanog komada, a može uzrokovati i povlačenje plazmenog luka, prikazano na slici 10, koje dovodi do bržeg erodiranja elektrode i sapnice [3].



Slika 9. Akumulacija troske s donje strane izrezanog komada uslijed premale brzine

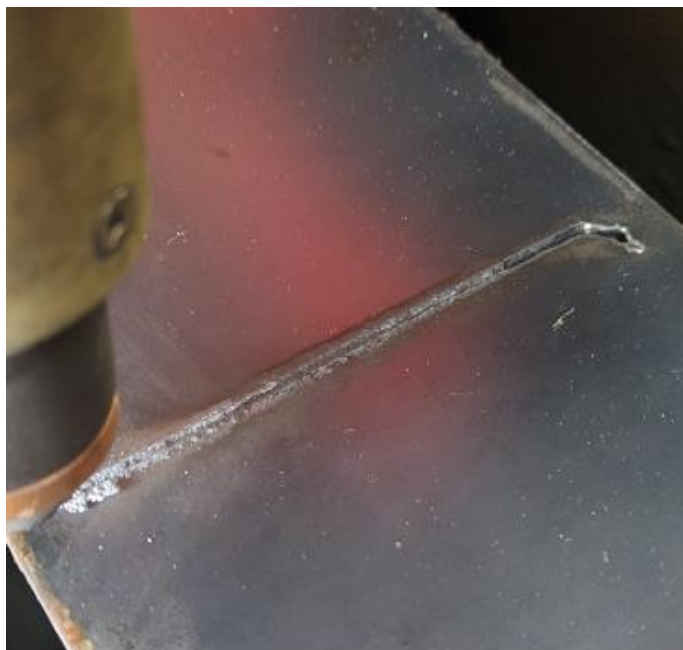


Slika 10. Povlačenje plazmenog luka [3]

Na slici 11 prikazana je troska s gornje strane obratka koja vizualno podsjeća na inje i otežano se odvaja od odrezanog komada, a posljedica je prevelike brzine rezanja [14]. Prevelika brzina rezanja može onemogućiti i uspješno ostvarivanje reza, odnosno materijal biva nepotpuno rastaljen i odnesen iz zone rezanja, kao što je vidljivo na slici 12.

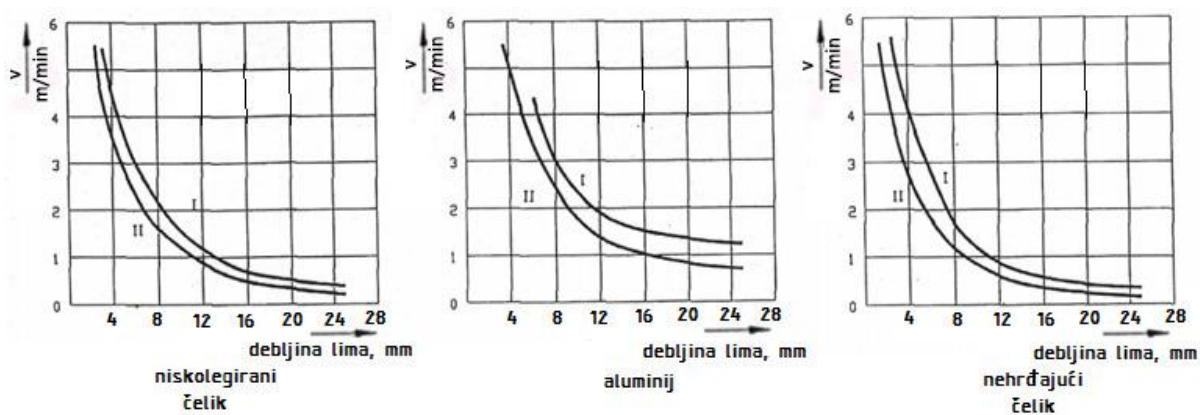


Slika 11. Troska s gornje strane obratka



Slika 12. Nepotpuno rezanje materijala

Na slici 13 prikazana su tri dijagrama koji prikazuju ovisnosti brzine rezanja, u metrima po minuti, o debljini rezanog materijala, u milimetrima za niskolegirani čelik, aluminij i nehrđajući čelik; pri čemu je krivulja s oznakom I maksimalna brzina plazma rezanja za promatranu debljinu, a krivulja s oznakom II maksimalna brzina plazma rezanja kod koje se još uvijek zadržava visoka kvaliteta reza (rezanje zrakom, bez sekundarnog plina, pri tlaku od 5 bara) [2]. Na slici 13 također se može primijetiti da brzina rezanja ovisi, ne samo o debljini, već i o vrsti materijala koji se reže. Aluminij, obzirom da je najmekši od tri prikazana metala, može biti rezan najvećim brzinama, dok je za visokolegirani Cr-Ni nehrđajući čelik potrebno koristiti manje brzine rezanja.



Slika 13. Ovisnost brzine o debljini rezanog materijala [2]

3.3. Odabir plazmenog plina

Primarni plinovi, odnosno oni koji se koriste za rezanje, mogu biti čisti (jedan element) ili mješavine. Najčešće se koriste zrak, kisik, dušik, argon ili mješavina argona i vodika [3]. Karakteristike plazmenog mlaza kao što su toplinska vodljivost plina, energija disocijacije, energija ionizacije, privlačenje oksida na reznu površinu, čistoća i širina reza variraju, između ostaloga, i o tome koji plin je korišten za njegovo stvaranje. Uz karakteristike koje utječu na rezna svojstva plina, valja također voditi računa i o pojedinostima kao što su dobavlјivost, cijena i čistoća plina [2]. Uz odabir optimalnog plazmenog plina za materijal koji se njime reže, potrebno je koristiti i preporučeni, odnosno odgovarajući protok plina. Protok plina je, kao i jačina struje i napona za rezanje, ovisan o debljini materijala koji se reže te o napajanju, odnosno gorioniku koji se koristi, a preporuča ga proizvođač napajanja i/ili gorionika. Prenizak ili previsok protok za primijenjenu sapnicu i elektrodu mogu uzrokovati formiranje dvostrukog plazmenog luka – prvi je pri tome neprenešen, odnosno teče od elektrode do sapnice, a drugi je prenešen i teče od sapnice do radnog komada. Dvostruki luk obično uzrokuje katastrofalno razaranje elektrode ili rastapanje sapnice [10]. Čistoća korištenog plina također je od velike važnosti; primjerice minimalna potrebna čistoća dušika za plazma rezanje je 99,995 %, odnosno kisika 99,5 %. Ako potrebna čistoća plina nije zadovoljena, može doći do smanjenja kvalitete reza, značajnog smanjenja životnog vijeka elektrode i/ili nemogućnosti probijanja tanjih materijala [9].

3.3.1. Zrak

Zrak se u početku pokazao kao relativno loš odabir plina za plazma rezanje, iako se zbog udjela kisika u zraku mogla postići i do 25 % veća brzina rezanja u odnosu na korištenje čistoga dušika. Upravo je navedeni udio kisika u zraku uzrokovao prebrzu eroziju elektroda i sapnica, unatoč tome što su se razvijale posebne, kvalitetnije elektrode za potrebe plazma rezanja plinom koji sadrži kisik. Uz eroziju potrošnih dijelova, na aluminiju i nehrđajućem čeliku se također stvarao i neprihvatljivo velik sloj oksida. Zahvaljujući razvoju elektroda i sapnica i napretcima u području njihove izrade, omogućeno je korištenje zraka kao plazmenog plina bez njihovog naglog erodiranja, stoga se zrak danas često koristi kao plin za stvaranje plazmenog mlaza primarno zbog svoje dostupnosti, cijene, jednostavnosti korištenja i visoke proizvodnosti kod rezanja ugljičnih ili Cr-Ni čelika [2,4]. Vijek trajanja potrošnih dijelova za rezanje zrakom je produljen, a njihova cijena je postala prihvatljiva. Kvaliteta reza se također može smatrati prihvatljivom za

većinu primjena, unatoč mjestimičnim pojavama nitracije na ugljičnim čelicima i oksidacije na nehrđajućim čelicima i aluminiyu. Za korištenje zraka kao plazmenog plina dovoljan je kompresor koji može ostvariti potreban protok i tlak, za razliku od ostalih plinova koji se moraju uzimati u bocama pod tlakom, što je skuplje, ali i opasnije za skladištenje. Kod korištenja zraka iz okoline koji se tlači kompresorom treba imati na umu da bilo kakve nečistoće i vlaga u zraku utječu na kvalitetu plazma rezanja, stoga je dobra investicija u tom slučaju imati pripremu za tretiranje zraka, to jest filtraciju i odvlaživanje prije nego što zrak dođe do napajanja.

3.3.2. Kisik

Izradom kvalitetnijih elektroda i sapnica od bakra i hafnija koje su učinile rezanje plinom koji sadrži kisik isplativim, otvorila se mogućnost korištenja i čistog kisika kao plazmenog plina. Plazma rezanje kisikom iziskuje manje struje rezanja, ostavlja minimalnu količinu troske na odreznom komadu, ima izvrsnu kvalitetu reza na aluminiyu i nehrđajućem čeliku, oštrije i pravokutne rubove reza, iziskuje manje naknadne obrade, ne smanjuje zavarljivost, deformabilnost ili obradivost odvajanjem čestica na izrezanom komadu i omogućuje veće brzine rezanja – čak do 30 % veće u usporedbi s ostalim plinovima. Iako je životni vijek elektroda i sapnica i dalje manji nego u slučaju rezanja dušikom ili argonom, ovaj nedostatak je nadomješten visokom razinom proizvodnosti pri rezanju ugljičnih ili Cr-Ni čelika kisikom, kao što je slučaj i kod rezanja zrakom [2,4].

3.3.3. Dušik

Iako je dušik primarni volumni konstituent atmosferskog zraka, svojstva rezanja čistim dušikom bitno se razlikuju od rezanja zrakom. Dušiku je potreban veći napon da bi se inicirao plazmeni luk, međutim ima veliku gustoću energije. Brzine rezanja su manje, ali su zato manje i temperature rezanja, što značajno produljuje životni vijek elektroda i sapnica. Zbog manjih temperatura, pri plazma rezanju dušikom mogu se koristiti i jeftinije volframove elektrode i sapnice, za razliku od plazma rezanja kisikom ili zrakom gdje je potrebno koristiti skuplje potrošne dijelove. Kvaliteta reza na aluminiyu i nehrđajućem čeliku je izvrsna, dok je kod ugljičnih čelika nešto lošija – dolazi do nitracije rezane površine i stvaranja troske [2].

3.3.4. Mješavine argona i vodika

Kod dualnih plinskih sustava (gdje se mogu koristiti dvije boce plina za stvaranje plazmenog mlaza umjesto jedne) u cilju poboljšavanja kvalitete reza na nehrđajućem čeliku i aluminiju može se koristiti i mješavina argona i vodika. Kao i kod rezanja dušikom, životni vijek potrošnih dijelova je značajno veći, a mogu se primjenjivati i jeftinije elektrode s volframom. Mješavina argona i vodika (najčešće mješavina „H-35“, odnosno 35 % vodik i 65 % argon) daje rezove visoke kvalitete za aluminij i nehrđajući čelik, a posebice se koristi kod rezanja većih debljina navedenih materijala (do 75 mm). Specifičnost kod korištenja mješavine je da različiti sadržaji imaju različit utjecaj na izgled reza: premalo vodika uzrokuje grublju površinu reza i njegovo zaobljenje, dok previše vodika daje gladi rez, ali povećava trosku s donje strane. Argon se koristi za olakšavanje uspostave luka i održavanje njegove stabilnosti, ali ima manji sadržaj energije i višu cijenu [2,9,15].

3.4. Odabir sekundarnog plina

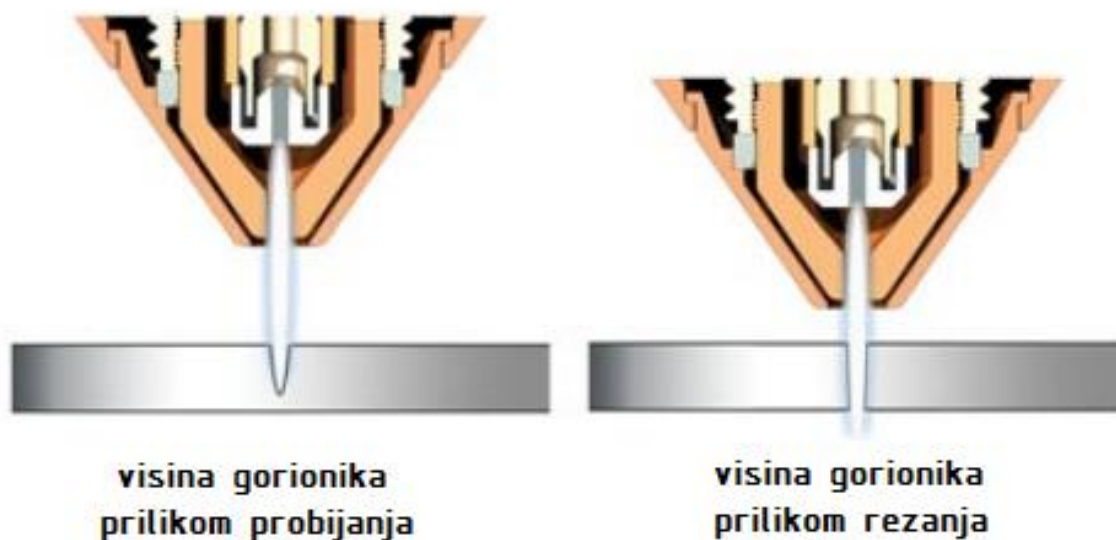
Iako korištenje sekundarnog zaštitnog plina nije obavezno kod plazma rezanja, ono ima značajne prednosti koje su navedene u ranijim poglavljima. U tablici 2 su prikazane neke od mogućih kombinacija plazmenih i sekundarnih plinova u ovisnosti o materijalu koji se reže.

Tablica 2. Plazmeni i sekundarni plinovi za različite materijale [8]

Vrsta materijala	Plazmeni plin	Sekundarni plin
Konstrukcijski čelik	Zrak	Zrak
	Kisik	Zrak ili kisik
	Kisik	Zrak ili zrak-dušik
Visokolegirani čelik	Zrak	Zrak
	Argon-vodik	Dušik
	Argon-vodik-dušik	Dušik
Aluminijeve legure	Zrak	Zrak
	Argon-vodik	Zrak ili dušik
	Zrak	Dušik-vodik

3.5. Udaljenost sapnice od radnog komada

Kod CNC plazma rezanja, udaljenost sapnice od radnog komada se može razdvojiti u više područja: valja razlikovati početnu visinu sapnice od radnog komada prilikom probijanja materijala (prije samog početka rezanja) i visinu sapnice prilikom rezanja. Početna visina probijanja materijala ovisi o korištenom napajanju i gorioniku, preporuča ju proizvođač, ali se taj parametar obično korigira prema radnim uvjetima i iskustvu operatera. Početna visina probijanja je nešto viša od visine koju sapnica ima za vrijeme rezanja i određuje se na upravljačkoj jedinici prije početka probijanja. Linearni podizač gorionika prije operacije probijanja i aktivacije plazmenog mlaza spušta gorionik sve dok sapnica ne dodirne radni komad – u tom trenutku dolazi do aktivacije mikroprekidača pri čemu upravljačka jedinica daje naredbu podizaču da podigne gorionik za iznos kojega je operater definirao i da ga zaustavi u tom položaju. Kod probijanja je ključno da je sapnica dovoljno blizu radnog komada da prenese plazmeni luk na njega, ali da je istovremeno i dovoljno daleko, tako da rastaljeni materijal koji se nakuplja na površini radnog komada pri početku probijanja ne dotakne sapnicu i uzrokuje pojavu dvostrukog plazmenog luka. Na slici 14 je prikazan odnos visina prilikom probijanja i rezanja.



Slika 14. Odnosi visina gorionika/sapnice prilikom probijanja i rezanja [3]

Trajanje probijanja materijala proporcionalno je njegovoj debljini, što može biti izuzetno problematično kod probijanja materijala većih debljina. Za slabije sustave koji režu strujom jakosti od oko 45 A, debljim materijalima se smatraju oni koji su debljine 10 mm i više, dok se

kod jačih sustava koji koriste struju jakosti od 150-200 A problematičnima smatraju materijali deblji od 25 mm. Kod rezanja materijala, sav rastaljeni metal se kroz zasjek reza otpuhuje iz zone rezanja, dok se kod probijanja on nakuplja odmah ispod sapnice, sve dok se materijal u potpunosti ne probije. Iz toga se može zaključiti da veća debljina materijala koji se probija označava i veću količinu rastaljenog materijala u točki probijanja. Upravo taj rastaljeni metal može uzrokovati kratki spoj, odnosno može fizički povezati štit sapnice ili sapnicu s pločom koja se reže, što uzrokuje razaranje sapnice i elektrode i oštećenje štita. Da bi se izbjegla ova pojava, kod probijanja debljih materijala se najčešće preporuča povećanje visine probijanja, što daje dodatan prostor za akumulaciju rastaljenog metala i drži sapnicu na sigurnoj udaljenosti. Uz povećanje početne visine probijanja, može se koristiti i metoda probijanja u dva koraka, metoda puzećeg probijanja ili početka rezanja na rubu ploče [3].

Početak rezanja na rubu se odnosi na to da plazmeni plin ne probija ploču negdje u njenoj unutrašnjosti, već da se G-kod CNC stroja napravi tako da se poveća ulazna putanja u komad koji se izrezuje i da se gorionik plazme pri iniciranju rezanja pozicionira na sam rub ploče iz koje se komad izrezuje. Povećanje ulazne putanje se vrši na računalu u nekom od programskih sučelja namijenjenima za slaganje potrebnih pozicija na ploču definirane geometrije, nakon čega program stvara G-kod kojega računalna upravljačka jedinica stroja može očitati. Na slici 15 je ljubičastom bojom prikazano povećanje ulazne putanje u komad u programskom sučelju FastNEST.



Slika 15. Povećanje ulazne putanje u programu FastNEST

Kada je program s povećanom ulaznom putanjom napravljen, potrebno je pozicionirati gorionik na sam rub ploče, tako da se početna točka ulazne putanje programa poklapa s rubom ploče iz koje se komad izrezuje (slika 16). Izbjegavanje probijanja ploče iniciranjem reza na njenom rubu omogućuje trenutačni izbačaj rastaljenog metala iz zone rezanja, a time se i sprječava akumuliranje rastaljenog metala u početnoj zoni rezanja. Ovom metodom se stoga ne mogu plazmom bušiti provrti na komadu koji se izrezuje (primjerice pločevine s provrtima za vijke i sl.), ali se ti provrti svakako mogu bušiti naknadno drugim postupcima obrade.



Slika 16. Iniciranje rezanja na rubu ploče

Nakon uspješnog probijanja materijala, visina sapnice se smanjuje na visinu rezanja koja je uvjetovana podešenim naponom i nastoji se održati konstantnom tokom rezanja. Operater prije početka rezanja podešava jakost struje i napona na napajanju i upravljačkoj jedinici, tako da napajanje nakon probijanja nastoji postići traženi napon preko otpora. Električni napon je u istosmjernom strujnom krugu prema Ohmovu zakonu jednak umnošku jačine struje i električnog otpora, odnosno kod suhog plazma rezanja, zrak između sapnice i radnog komada ima funkciju otpora. Što je veći iznos unesenog napona na upravljačkoj jedinici, to je veća udaljenost sapnice od radnog komada prilikom rezanja (to jest veći je otpor u strujnom krugu), a što je traženi napon manji, to je manja i udaljenost između sapnice i radnog komada (a time i otpor) [3]. U slučaju podvodnog plazma rezanja, princip regulacije je jednak, osim što funkciju otpora preuzima voda umjesto zraka.

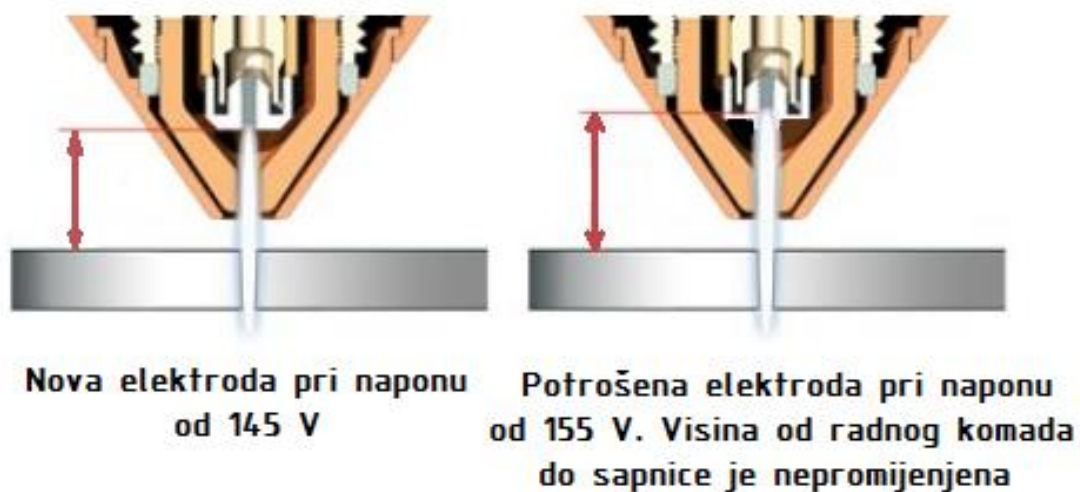
Ovakav način aktivne regulacije visine za vrijeme rezanja se koristi zbog potencijalnih nečistoća ili deformacija na materijalu koji se reže. Ako je materijal deformiran i ima primjerice izbočinu ili masnoće na sebi, regulacijski krug detektira smanjenje napona (uzrokovano smanjenjem udaljenosti/otpora od sapnice do radnog komada) i naređuje linearnom podizaču gorionika da podiže gorionik (a time i sapnicu) sve dok izmjereni (trenutačni) napon u strujnom krugu ne odgovara onome naponu koji je podešen na upravljačkoj jedinici. Isti princip rada vrijedi i u obratnom slučaju, odnosno kada je lim udubljen, detektira se povećanje napona zbog većeg otpora i linearni podizač spušta gorionik dok se vrijednost napona ne stabilizira na traženoj vrijednosti.

Iskustvo operatera kod određivanja napona (a time i visine sapnice od radnog komada) najviše dolazi do izražaja kod kompenziranja potrošnje elektrode. Konkretnije, svaka elektroda se troši tokom rezanja, njena duljina se smanjuje i stvara se rupa na njenom vrhu. Na slici 17 su prikazane djelomično potrošena i nova elektroda, te je primjetno spomenuto povećanje rupe na sredini potrošene elektrode. Sustav za regulaciju visine registrira povećanje otpora, međutim ne zna radi li se o udubljenju na limu ili potrošnji elektrode, te približava sapnicu radnom komadu da bi vratio i stabilizirao napon na početnu vrijednost. Ovo može uzrokovati značajne probleme, jer je cilj zadržati konstantnu udaljenost od sapnice do radnog komada. Ako se sapnica spusti preblizu radnom komadu u opasnosti je od naljepljivanja rastaljenog metala na sebe i formiranja dvostrukog plazmenog luka. Uz to, može doći i do preranog erodiranja potrošnih dijelova zbog prevelike blizine području visoke temperature.



Slika 17. Djelomično potrošena elektroda (lijevo) i nova elektroda (desno)

Iskusni operater može kontinuiranim praćenjem stanja elektrode postepeno povećavati napon u iznosima od 2 V kako se elektroda sve više i više troši, prikazano na slici 18, i na taj način održavati visinu rezanja približno konstantnom [3].



Slika 18. Održavanje konstantne visine rezanja povećanjem napona [3]

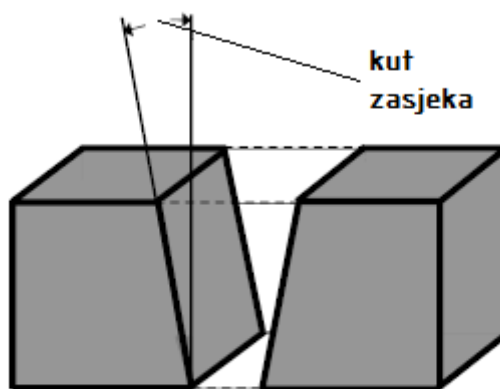
Na slici 19 je prikazan katastrofalni raspad elektrode i sapnice uzrokovan prealom udaljenosti od radnog komada, odnosno elektroda se tokom rada trošila, a napon se nije povećavao.



Slika 19. Uništena elektroda i sapnica

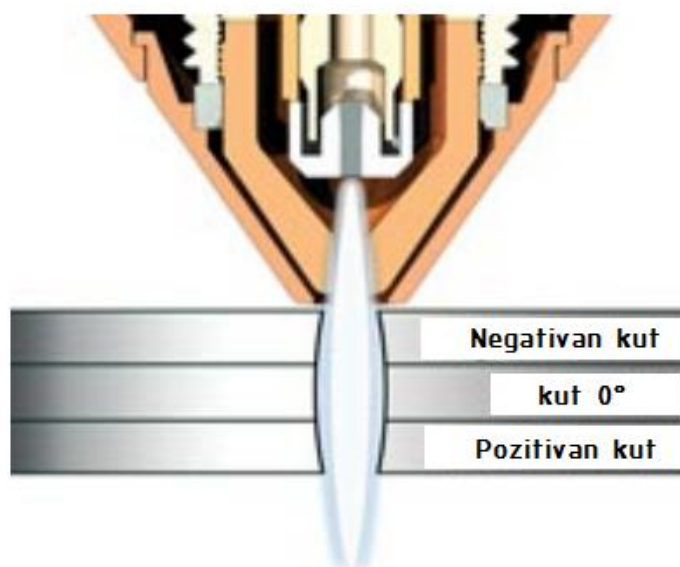
3.6. Širina i kut zasjeka

Zasjek (engl. *kerf*) je naziv za rez na materijalu koji ima svoje karakteristične veličine – širinu i kut (nagib). Širina i kut zasjeka su u korelaciji s drugim parametrima, to jest na njihove iznose utječu snaga rezanja (korištena struja), brzina rezanja, vrsta i debljina materijala, udaljenost sapnice od radnog komada i korišteni plin, odnosno plinovi [9]. Kut zasjeka je pojava najlakše uočljiva kod plazma rezanja zrakom. Kao što je vidljivo na slici 20, širina zasjeka na vrhu radnog komada je veća nego na dnu, odnosno rez je napravljen pod kutem [16].



Slika 20. Kut zasjeka pri plazma rezanju zrakom [16]

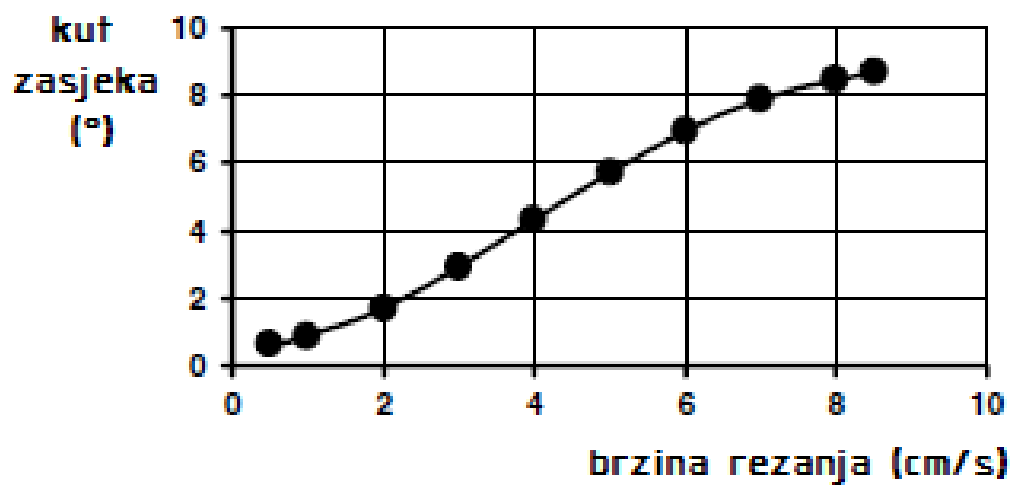
Ako se promatra utjecaj snage rezanja na širinu zasjeka, vrijedi pravilo da veća struja rezanja uzrokuje širi zasjek, dok smanjenje struje rezanja smanjuje i širinu zasjeka, iako treba voditi računa da premala jačina struje može onemogućiti probijanje materijala i ostvarivanje reza uopće. Brzina rezanja djeluje na zasjek tako da se pri niskim brzinama ostvaruje pravokutniji rez, ali s većom širinom zasjeka, dok veće brzine ostavljaju veći kut zasjeka, ali male širine. Iako se u većini CNC plazma sustava visina, tj. udaljenost sapnice od radnog komada prilikom rezanja definira preko napona, važnost ispravnog funkcioniranja sustava za regulaciju visine gorionika leži u tome da manja udaljenost sapnice od radnog komada daje uži zasjek, dok veća udaljenost uzrokuje širi rez [9]. Kut zasjeka također može imati osjetne varijacije obzirom na visinu sapnice, što je prikazano na slici 21. Prevelika udaljenost sapnice uzrokuje tzv. pozitivan kut zasjeka, dok premala udaljenost uzrokuje tzv. negativan kut. Ako je sapnica na optimalnoj udaljenosti prilikom rezanja, kut zasjeka ima minimalan iznos [3]. Utjecaj odabira reznog (i zaštitnog) plina na širinu i kut zasjeka je objašnjen ranije u poglavlju 3.3.



Slika 21. Utjecaj udaljenosti sapnice na kut zasjeka [3]

Dodatni faktori koji mogu uzrokovati nepovoljne širine i kuteve zasjeka su dotrajalost potrošnih dijelova, moguće izbočine ili udubine na radnom komadu koje sustav za regulaciju visine ne registira dovoljno brzo, uporaba pogrešnog distributera plina ili neokomitost gorionika u odnosu na radni komad. U suštini, niska visina i/ili premala brzina rezanja uzrokuju negativni kut zasjeka, dok prevelika visina i/ili brzina rezanja uzrokuju pozitivni kut rezanja. Stoga ako se na odrezanom komadu javlja negativni kut zasjeka, potencijalno rješenje za ispravljanje kvalitete reza je povećanje visine ili brzine rezanja, dok se smanjenje visine ili brzine može koristiti kada se pri rezanju javi pozitivan kut zasjeka.

Kod širine zasjeka i veličine njegovog kuta najvažnije je naći kompromis između kvantitete i kvalitete, odnosno potrebno je pronaći vrijednost brzine rezanja koja zadovoljava kriterije proizvodnosti, ali da se i dalje postigne zadovoljavajuća kvaliteta reza, odnosno prihvatljiv kut zasjeka. Treba imati na umu da se pri znatno većim brzinama rezanja od preporučenih, bez obzira na zahtjeve na kvalitetu izrezanog komada, kut zasjeka može povećati do te mjere da se rubovi reza s donje strane obratka međusobno previše približe te se tako zavare [16]. Na slici 22 prikazan je dijagram u kojemu je proračunat iznos kuta zasjeka u ovisnosti o brzini rezanja za plazma rezanje zrakom konstrukcijskog čelika debljine 12,7 mm.



Slika 22. Ovisnost kuta zasjeka o brzini rezanja za plazma rezanje zrakom [16]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. O poduzeću

Poduzeće Medved Metali, u kojemu se obavljao eksperimentalni dio ovog rada, je prvotno nastalo pod imenom Medo Metal, koje je 1995. godine u Velikoj Gorici osnovao Josip Medved. Obrt se u početku bavio isključivo proizvodnjom, montažom i servisom sekcijских garažnih vrata. Razvojem poduzeća, asortiman je proširen na „rola“ i PVC (Polivinilov klorid) brzopodizna vrata. Nakon smrti osnivača i vlasnika 2015. godine poduzeće preuzima njegov sin, Tomislav Medved, i mijenja ime u Medved Metali. Poduzeće Medved Metali je prvotno bilo smješteno u dvorištu i garaži obiteljske kuće direktora i vlasnika Tomislava Medveda. Rastom poduzeća i sve većim obujmom posla, povećala se i potreba za prostorom i zapošljavanjem dodatnih djelatnika. 2016. godine proizvodni pogon se premješta u iznajmljeni prostor u mjestu Mraclin, nedaleko od Velike Gorice; za to vrijeme imaju sedmero zaposlenika. Kroz sljedećih nekoliko godina nabavom dodatnih strojeva i opreme, poduzeće kupuje na stečajnoj dražbi zemljište s djelomično završenom proizvodnom halom, te se 2018. godine po završetku radova na hali proizvodnja seli iz Mraclina u Čičku Poljanu. Nova proizvodna hala prikazana na slici 23 je većinom završena, iako se i dalje nadograđuje novim strojevima i pratećom opremom.



Slika 23. Proizvodna hala poduzeća Medved Metali u Čičkoj Poljani

Tijekom godina rada poduzeće je imalo širok spektar kupaca iz svih dijelova Republike Hrvatske, ali su se također obavljali i poslovi za inozemstvo (Francuska, Mađarska, Srbija, Italija

itd.). Primarni naručitelji garažnih i brzopodiznih vrata su poslovni korisnici iz kemijske, tekstilne, drvene, naftne, prehrambene industrije i slično. Bravarske proizvode kao što su dvorišne ograde i razne čelične konstrukcije (nadstrešnice, stepeništa, namještaj, razni nosači i dr.) naručuju uglavnom privatni korisnici, ali su se također obavljali i razni bravarski poslovi za nekoliko ambasada i općina. Trenutno je u poduzeću zaposleno osamnaest djelatnika koji imaju dugogodišnje radno iskustvo.

4.2. Lokacija

Ured za odnose s kupcima, prodaju potrošnih dijelova i knjigovodstvo se nalazi u Velikoj Gorici u prizemlju kuće vlasnika poduzeća Tomislava Medveda. U sklopu kuće također se nalazi i izložbeni salon u kojemu se mogu pogledati primjeri nekih od proizvoda kao što su garažna sekcijaska vrata, brzopodizna vrata, bravarski proizvodi poput uzoraka čeličnih i aluminijskih ograda i industrijski namještaj kombiniran s masivnim drvom (stolovi, police, kuhinjski elementi i sl.). Proizvodni pogon poduzeća Medved Metali se nalazi u Čičkoj Poljani u sklopu Općine Velika Gorica, otprilike petnaest minuta vožnje od samog grada Velike Gorice. Obzirom na višestruke proizvodne pogone u blizini, to područje slovi kao nova industrijska zona u Općini Velika Gorica.

4.3. Proizvodni program

Na početku poglavlja je već navedeno kako su garažna vrata glavni (i najpoznatiji) proizvod poduzeća, iako bravarski proizvodi i čelične konstrukcije postepeno uzimaju sve veći udio proizvodnje. Raznolik asortiman strojeva, kao što su tračne pile, NC (engl. *Numerical Control*) hidraulične škare, CNC plazma rezač, tokarilica, NC preša i NC glodalica, u kombinaciji sa CO₂ MAG (engl. *Metal Active Gas*) zavarivanjem, omogućuje da se pojedini proizvod prilagodi specifičnim željama kupca, tako da je moguće po potrebi osmisliti i konstruirati neki dio ili određeni pomoćni alat kako bi se ispunili zahtjevi kupca. Uz samu funkcionalnost i kvalitetu svakog pojedinog dijela, u današnje vrijeme je potrebno voditi računa i o estetici samog proizvoda, tako da poduzeće ima blisku suradnju s nekolicinom cinčaona i obrta za plastifikaciju metalnih proizvoda i poluproizvoda, s ciljem da konačni proizvod čim više ispunjava zahtjeve čak i najzahtjevnijih kupaca.

Najčešće korišten materijal u poduzeću je konstrukcijski čelik. Kvadratne i okrugle cijevi, šipke i profili se koriste za izradu ograda i drugih konstrukcija i pripadajućih dijelova, dok se čelični lim

koristi za izradu panela za garažna vrata. Uz konstrukcijski čelik, ponekad se obrađuju i aluminijske cijevi i lim ili lim od nehrđajućeg čelika.

4.4. CNC plazma rezač

Stroj za CNC plazma rezanje koje je poduzeće Medved Metali ustupilo za provođenje eksperimenta se u pogonu primarno koristi za rezanje konstrukcijskog čelika, aluminija i nehrđajućeg čelika debljine do 10 mm, iako ima mogućnosti rezanja i većih debljina. Konstrukcija stroja prikazanog na slici 24 se sastoji od stola u zavarenoj izvedbi kineskog proizvođača HectMac koji može primiti pločasti materijal maksimalnih dimenzija 1500 x 4000 mm i konzola koja ostvaruje gibanje po x osi, odnosno po dužini stola.



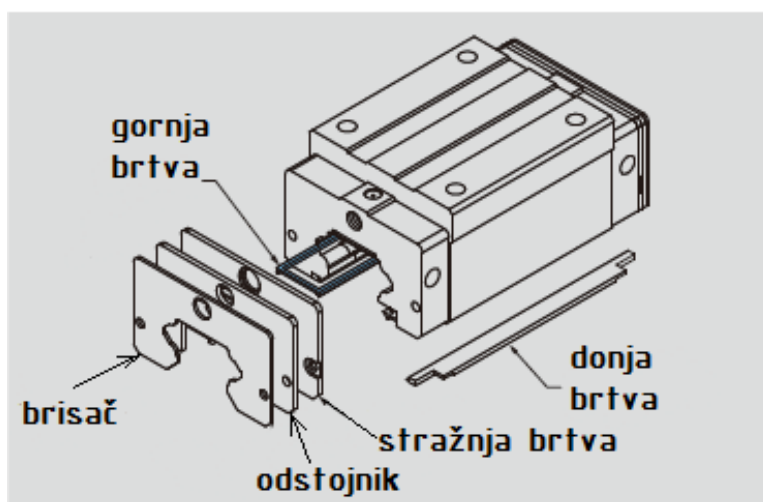
Slika 24. CNC plazma stroj u maloj hali poduzeća Medved Metali

Ostvarivanje gibanja po x i y osi omogućeno je klizačima s kotrljajućim tijelima proizvođača HIWIN i vodilicama u obliku lastinog repa, tako da sa svake strane po dužini stola dolazi po jedna vodilica na koju zbog mase konzole dolazi po jedan par klizača za ostvarivanje gibanja po x osi. Na konzoli se također nalazi jedan par vodilica i na svakoj od njih po jedan klizač za ostvarivanje gibanja po y osi. Sklop vodilice i klizača je prikazan na slici 25.



Slika 25. Vodilica i klizači CNC plazma stroja

Klizače s okruglim kotrljajućim tijelima općenito odlikuje niski faktor trenja (manji od trenja klizanja), mala masa, brzo pozicioniranje i dolaze kao gotovi kupovni elementi što omogućuje njihovu brzu i jednostavnu ugradnju ili zamjenu [17]. Klizače HIWIN HGH25CA Z0H kakvi se nalaze na stroju, i prikazani su na slici 26, također odlikuje velika otpornost na nečistoće i prašinu, kojih prilikom plazma rezanja ima napretek, stoga također posjeduju i brisače s obje strane i četverostruku brtvu koji umanjuju ulazak navedenih nečistoća u sam sklop klizača [18].



Slika 26. Klizač HIWIN HGH25CA Z0H [18]

Za očuvanje niskog faktora trenja u sklopu vodilice i klizača zadužena je uljna pumpa stroja, koja opskrbljuje svih 6 klizača uljem preko mazalica; kapaciteta je 1,2 litre i dobavlja 0,3 cm³ ulja po satu na svaki klizač.

Mikroprekidači na krajevima svih vodilica služe za zaustavljanje konzole kada se dovede na rubove stola po dužini, odnosno zaustavljaju gibanje vertikalnog podizača kada se on dovede na rubove konzole. Manji mikroprekidači se također nalaze i unutar vertikalnog podizača koji se nalazi na konzoli i ostvaruje gibanje gorionika po y i z osi, odnosno ostvaruje gibanje po širini stola i omogućuje pozicioniranje gorionika po visini, a prikazan je na slici 27 bez zaštitne maske kako bi bili vidljivi njegovi sastavni dijelovi.



Slika 27. Vertikalni podizač CNC plazma stoja bez zaštitne limene maske

Vertikalni podizač je sklop koji se sastoji od elektromotora, tri mikroprekidača za detekciju ploče i za krajnji gornji i donji položaj, trapeznog navojnog vretena, dvije vodilice kružnog presjeka i brončane matice smještene u kućištu s kojim je povezan nosač gorionika.

Pomicanje vertikalnog podizača i konzole se ostvaruje preko računala, prikazanog na slici 28, koje također služi i za čitanje G-koda i definiranje parametara obrade kao što su nultočka obrađivane ploče, brzina rezanja, zasjek, napon, visina sapnice i otklon prilikom probijanja. Na računalu se također mogu izvesti i korekcije trenutno korištenog G-koda.



Slika 28. Računalna jedinica CNC plazma stroja

Napajanje, odnosno izvor struje koji se nalazi u sklopu ovog stroja je model Powermax45 američkog proizvođača Hypertherm snage 8 kW (slika 29). Powermax45 može raditi sa ulaznom monofaznom ili trofaznom strujom, a izlazna struja mu je maksimalne jakosti 45 A i napon 132 V istosmjernje struje. Ovo napajanje je kompatibilno sa zrakom ili dušikom, čiji je preporučeni protok za rezanje metala $10,2 \text{ m}^3$ po satu pri tlaku od 5,5 bara, odnosno 4,13 bara za dubljenje metala. Sustav Powermax45 se može koristiti za rezanje ili dubljenje čelika debljine do 25 mm [19].



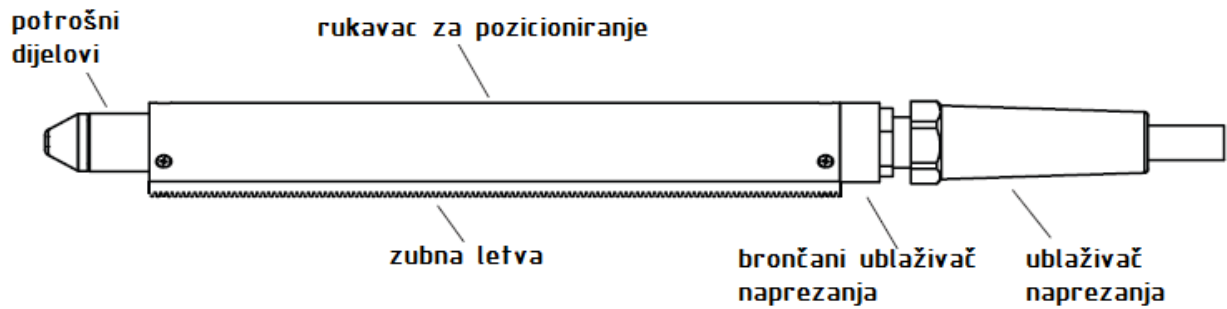
Slika 29. Napajanje Hypertherm Powermax45

U poduzeću Medved Metali ovaj sustav radi na zrak kojeg tlači industrijski kompresor talijanskog proizvođača GIS, model GS35/200/600 snage 4 kW i zapremine 200 litara. Ostvarivi protok ovoga kompresora je 600 litara u minuti i maksimalni ostvarivi tlak je 11 bara, što je više nego dovoljno za potrebe koje iziskuje napajanje [20]. Također, priprema za zrak, prikazana na slici 30, služi za odvajanje vlage i smještena je neposredno prije napajanja da bi se poboljšala kvaliteta zraka od kojeg se stvara plazmeni mlaz.



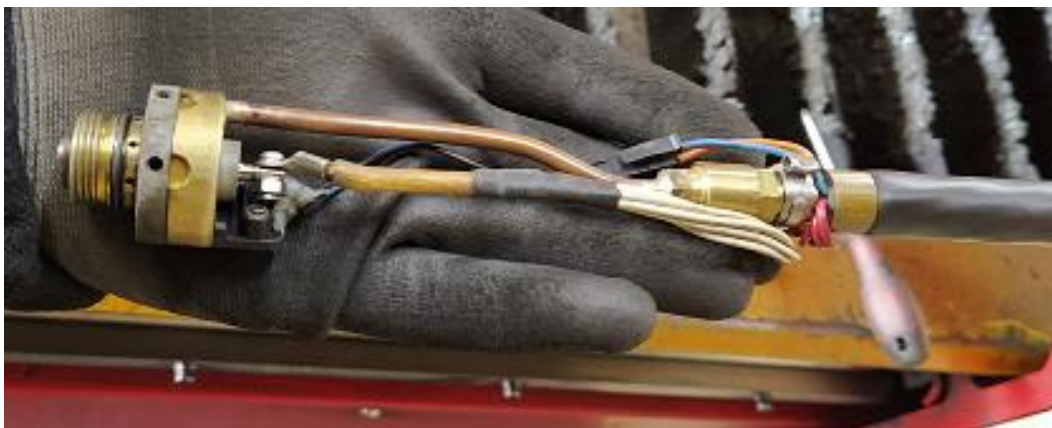
Slika 30. Priprema za odvajanje vlage iz zraka

Posljednji dio stroja kojega valja spomenuti je upravo onaj koji realizira rezanje plazmenim mlazom – gorionik. Stroj u poduzeću Medved Metali je opremljen gorionikom T45m proizvođača Hypertherm. Ovaj gorionik je preporučen od strane proizvođača za korištenje u kombinaciji s napajanjem Powermax45, obzirom da su mu mogućnosti u korelaciji s mogućnostima napajanja – maksimalna debljina rezanja iznosi 25 mm, dozvoljeno je rezanje sa zrakom ili dušikom i maksimalna jačina struje ne smije prelaziti 45 A [21]. Gorionik se sastoji od dijelova prikazanih na slici 31.



Slika 31. Dijelovi gorionika Hypertherm T45m [21]

Unutar rukavca za pozicioniranje se nalazi crijevo za dovod plazmenog i sekundarnog plina i električni vodiči koji dovode električnu struju do elektrode i sapnice. Uz crijevo i vodiče na samom vrhu se nalazi i mikroprekidač koji služi za detekciju vrha gorionika u kojemu su potrošni dijelovi, odnosno u slučaju da se vrh gorionika odviše od rukavca dok je napajanje aktivno, mikroprekidač šalje informaciju napajanju da prekine dovod zraka i napona, zaustavi obradu i oglasi alarm. Sadržaj rukavca je prikazan na slici 32.



Slika 32. Sadržaj rukavca gorionika Hypertherm T45m

Na samom vrhu gorionika nalazi se sklop sa potrošnim dijelovima koji pretvaraju plin u plazmeni mlaz. Sklop kakav se nalazi na gorioniku T45m omogućuje rezanje sa sekundarnim plinom koji je isti kao i plazmeni plin. Na slici 33 prikazani su razdvojeni dijelovi vrha gorionika koji su redom s lijeva na desno: brončani štit, bakelitni cilindar, sapnica, prsten kovitlanja i elektroda.



Slika 33. Potrošni dijelovi vrha gorionika Hypertherm T45m

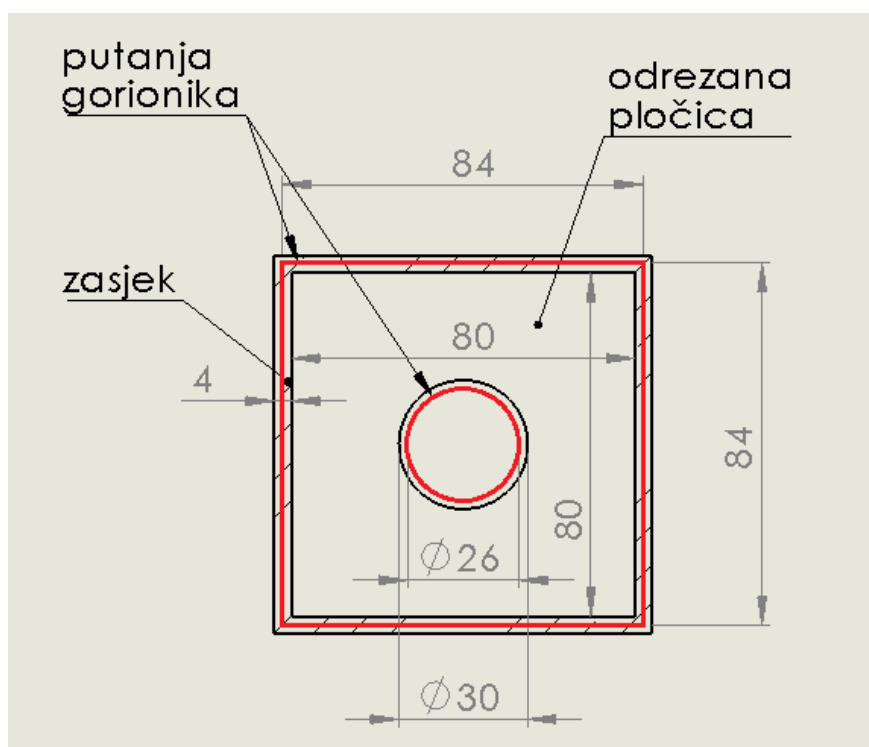
5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Eksperimentalno istraživanje opisano u ovome radu se provodi sa ciljem određivanja stvarne vrijednosti zasjeka plazmenog mlaza u svrhu povećanja dimenzijske točnosti aluminijskih i čeličnih obradaka izrezanih CNC plazma strojem u poduzeću Medved Metali. Primarni cilj eksperimenta je na temelju mjerenja pravokutnih ispitnih uzoraka izrezanih plazmenim mlazom utvrditi optimalne vrijednosti parametra zasjeka za različite materijale različitih debljina, pod uvjetom da su brzina rezanja, jačina struje i napon konstantni za svaki pojedini materijal i njegovu debljinu. Drugi cilj ovog eksperimenta je utvrđivanje točnosti x i y osi stroja, odnosno mjerenjima se ispituje ima li rez po x osi veću točnost od reza po y osi, što može pomoći operaterima u poduzeću kod orijentiranja izrezivanih komada u budućnosti, tako da se stranice obradaka koje imaju strože zahtjeve na točnost pozicioniraju uzduž točnije osi stroja. Što je veća točnost stroja, to je manji utrošak vremena potrebnog za zavarivanje pozicija prilikom sklapanja, odnosno montaže. Potrošnja dodatnog materijala prilikom zavarivanja se također smanjuje povećanjem točnosti stroja. U skladu s gore navedenim, smanjuje se ukupno vrijeme izrade, odnosno smanjuju se troškovi izrade čime se povećava konkurentnost poduzeća na tržištu.

5.1. Određivanje zasjeka i preciznosti osi stroja

Priprema za plazma rezanje kreće od izrade G-koda u odgovarajućemu programu, što programer obavlja na računalu, da bi se nakon toga G-kod preko memorijskog ključa prebacio na upravljačku jedinicu stroja. Nakon učitavanja G-koda i prije početka obrade, CNC operater mora na napajanju podesiti potreban iznos jačine električne struje i protoka plazmenog plina (u ovom slučaju zraka) i na upravljačkoj jedinici stroja definirati brzinu rezanja, iznos zasjeka, vrijednost napona, vremenski otklon i početnu visinu sapnice prilikom probijanja materijala. Neke CNC upravljačke jedinice rade u kombinaciji s programskim paketima koji posjeduju biblioteke u kojima su pohranjene vrijednosti zasjeka za svaki obrađivani materijal i njegovu debljinu, međutim, upravljačka jedinica stroja u poduzeću Medved Metali nema tu opciju, stoga je potrebno ručno unijeti iznos zasjeka prije puštanja programa u rad. Unos ispravne vrijednosti zasjeka je od ključne važnosti, jer se on za razliku od svih ostalih ranije nabrojanih parametara koji se definiraju prije početka obrade ne može korigirati nakon što obrada započne. Upravljačka jedinica stroja prije početka obrade na temelju vrijednosti zasjeka kompenzira putanju gorionika, tako da nakon izrezivanja dimenzije obratka odgovaraju traženim dimenzijama. Na primjer, ako

je cilj izrezati kvadratnu pločicu konačnih dimenzija 80 x 80 mm s unesenim parametrom zasjeke 4 mm, upravljačka jedinica putanju gorionika kompenzira tako da ju udalji od svake konture za pola iznosa zasjeke, stoga gorionik u stvarnosti napraviti putanju dimenzija 84x84 mm. U slučaju da se radi o konturi unutar komada koji se izrezuje, primjerice ako komad ima provrt promjera 30 mm, tada se gorionik pomiče bliže središtu provrta za pola dimenzije zasjeke u svakoj točki kružnice i radi zapravo putanju promjera 26 mm [22]. Na slici 34 je prikazana putanja gorionika u odnosu na dimenzije gotovog komada.



Slika 34. Putanja gorionika u odnosu na iznos zasjeke

Širina zasjeke se može saznati mjerenjem ravnoga reza na samoj ploči, međutim točnije mjerenje se može ostvariti mjerenjem odrezanog komada, odnosno na njemu se može izmjeriti koliko njegova dimenzija odstupa od nominalne vrijednosti, te se na temelju tog podatka može izračunati širina zasjeke.

5.2. Izrezivani materijali

Materijali koji se izrezuju za potrebe ovoga eksperimenta su konstrukcijski čelik oznake S235JR, aluminij oznake AlMg3 i nehrđajući čelik oznake X5CrNiMo17-12-2. Od svakog se materijala ispitivanje vrši za tri debljine: 2, 4 i 6 mm, pri tome se iz svake debljine izrezuje po devet ispitnih uzoraka, odnosno ukupno 81 ispitni uzorak.

5.2.1. Konstrukcijski čelik S235JRG2

Konstrukcijski čelici zauzimaju većinski maseni udio u svjetskoj proizvodnji čelika (65 do 80 %) i imaju širok spektar primjene – mogu se koristiti za izradu tipičnih strojnih elemenata, ali i za izradu nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase poput mostova, dizalica, brodskih konstrukcija, dijelova vozila (primjerice šasija) i slično. Nemaju propisani kemijski sastav, ali imaju zajamčena mehanička svojstva. Zbog česte primjene i obrađivanja ovakvih materijala u proizvodnji, od njih se očekuje da imaju dobru zavarljivost i hladnu oblikovljivost. Po pitanju mehaničkih svojstava moraju posjedovati dovoljnu nosivost i sigurnost, što im omogućuju dovoljna granica razvlačenja (R_e), vlačna čvrstoća (R_m), tlačna čvrstoća (R_{mt}), savojna čvrstoća (R_{ms}), smična čvrstoća (R_{mu}) i žilavost. Konstrukcijski čelici moraju zadržavati dovoljne vrijednosti za navedena mehanička svojstva i pri sniženim temperaturama. Čelik S235JRG2 se primjenjuje za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krkog loma, a neka od njegovih najvažnijih mehaničkih svojstava su dana u tablici 3 [1].

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika S235JRG2 [1]

Oznaka čelika	Mehanička svojstva									
	R_m [N/mm ²] za debljinu [mm]		Granica razvlačenja R_{eH} [N/mm ²] za debljinu [mm]					A_5 [%]	Min KV [J] za debljinu d [mm]	
	≤ 3	3 – 100	≤ 16	16 – 40	40 – 63	63 – 80	80 – 100	min	pri °C	$d = 10$ – 63
S235JRG2	360 – 510	340 – 470	235	225	215	215	215	21	+20	27

5.2.2. Aluminij AlMg3

Aluminij u odnosu na čelik ima kompleksniju i skuplju proizvodnju, ali unatoč tome nezamjenjiv je u granama industrije poput zrakoplovne, prehrambene i automobilske, a i sve više se koristi u elektrotehnici. Svojstva koja ga čine toliko prikladnim za primjenu u navedenim industrijama su vrlo povoljan omjer čvrstoće i gustoće (tzv. specifična gustoća), dobra mogućnost povećanja čvrstoće precipitacijskim očvrnućem i legiranjem, odličan omjer električne vodljivosti i gustoće, visoka toplinska vodljivost i toplinska rastezljivost, visoka razina tople i hladne

deformabilnosti i visoka korozijska postojanost unatoč velikom afinitetu prema kisiku. Upravo zbog navedenoga afiniteta prema kisiku posjeduje gust i nepropusni oksidni sloj na površini koji se brzo obnavlja u slučaju da se ošteti i postaje sve otporniji što ga se više oksidira, što čini aluminij otpornim i na koncentrirane kiseline. Aluminij se može primjenjivati i u građevini, no zbog svoje neotpornosti na lužine koje uništavaju zaštitni oksidni sloj na aluminiju, potrebno ga je zaštititi od morta i građevinskoga vapna folijama ili nekim drugim oblicima zaštite. Tehnički (nelegirani) aluminij se tako koristi za aparate, u graditeljstvu (krovovi, žljebovi i ukrasi), za izradu folija i ambalaže, za posuđe i rezervoare u kemijskoj i prehrambenoj industriji i za izradu električnih vodiča. Aluminij se prvenstveno legira u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava, prvotno vlačne čvrstoće i tvrdoće, te zatim krutosti, rezljivosti i dr. Najvažniji legirni elementi za aluminij su bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. Aluminij korišten u ovom pokusu je AlMg3, što znači da je legiran s magnezijem, a njegov detaljniji kemijski sastav je dan u tablici 4. Glavne karakteristike ove legure su dobra korozijska postojanost i dobra mogućnost poliranja (ostvarivanje visokog sjaja površine), a njena mehanička svojstva su dana u tablici 5 [1].

Tablica 4. Kemijski sastav legure AlMg3 [1]

Oznaka legure		Kemijski sastav, maseni udio [%]	
DIN	Stara HRN	Legirni elementi	Dozv. nečistoće maks.
G-AlMg3	P.AlMg3.01	Mg 2,5 – 3,5; Mn 0,001 – 0,4; Ti 0,001 – 0,2; Al ost.; Be na zahtjev	Cu 0,05; Fe 0,5; Si 0,5; Zn 0,10; ostalo: pojed. 0,05; ukupno 0,15

Tablica 5. Mehanička svojstva legure AlMg3 [1]

Oznaka legure	Mehanička svojstva				Gustoća [kg/m ³]
	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_5 [%]	HB _{5/250}	
G-AlMg3	70...100	140...190	3...8	50...60	2700

5.2.3. Nehrdajući čelik X5CrNiMo17-12-2

Nehrdajući čelici su specifični po svojoj korozivnoj postojanosti, odnosno posjeduju otpornost na djelovanje okolnog medija. Korozivnijim materijalom se smatra onaj kod kojega u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manje intenzivnog razaranja površine ili neželjene promjene u mikrostrukturi. Materijali koji nisu korozivni postojani se mogu zaštititi primjenom površinske zaštite različitim metalnim i nemetalnim prevlakama, katodnom zaštitom, konstrukcijskim mjerama, dodavanjem inhibitora korozije u okolni medij i dr. Uvjeti da čelik bude korozivno postojan je sadržavanje minimalno 12 % kroma u čvrstoj otopini i posjedovanje homogene monofazne mikrostrukture (odnosno isključivanje mogućnosti nastanka galvanskog članka u strukturi). Korozivno postojani čelici stoga imaju potpuno feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih faza.

Čelik korišten u ovome eksperimentu spada u skupinu austenitno feritnih čelika s manje od 10 % δ ferita. Osnovna svojstva ovakvih čelika su nemagnetičnost zbog austenitne strukture, dobra oblikovljivost u hladnom stanju (visoka istežljivost A_5 i udarni rad loma, a niska vlačna čvrstoća i granica tečenja), mogućnost očvršćenja deformacijom, vrlo dobra otpornost na puzanje pri povišenim temperaturama (iznad 600 °C) ako se dodatno legiraju s molibdenom, volframom i vanadijem, otpornost na organske i anorganske kiseline, lužine i soli i dobra žilavost pri sniženim temperaturama, stoga se mogu primjenjivati i teorijski do -273 °C. Čelik X5CrNiMo17-12-2 je povišeno otporan na neoksidirajuće kiseline i točkastu koroziju uslijed djelovanja halogenih medija, otporan je i na interkristalnu koroziju bez toplinske obrade, a koristi se primjerice u industriji celuloze, boje, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i u pivovarama [1]. Mehanička su mu svojstva prikazana u tablici 6.

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2 [1]

Oznaka čelika (EN)	Sastav „ostalo“, maseni udio [%]	Mehanička svojstva pri 20 °C				
		$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	HB, maks.	A_5 , min. [%]	KU, min. [J]
X5CrNiMo17-12-2	2,25 Mo	205	700	180	45	85

5.3. Parametri rezanja

Kao što je u prethodnim poglavljima spomenuto, brzina rezanja ovisi o više faktora, među kojima su ključni vrsta materijala, jačina struje i debljina koja se reže. Za rezanje ispitnih uzoraka iz konstrukcijskog čelika koriste se vrijednosti brzine rezanja u ovisnosti o debljini materijala za struju jačine 45 A dane u tablici 7 i vrijednosti trajanja probijanja u ovisnosti o debljini materijala iz tablice 8. Vrijednosti navedene u tablicama 7 i 8 preporuča proizvođač Hypertherm za model napajanja Powermax45 u kombinaciji s gorionikom T45m. Može se primijetiti da se za debljine od 10 mm i više preporuča primjena metode početka rezanja na rubu. Prikazane preporučene vrijednosti bi u idealnim uvjetima obrade ostvarile visoku proizvodnost, predviđeno trošenje potrošnih dijelova i zadržavanje optimalnih karakteristika obratka.

Tablica 7. Preporučene brzine rezanja niskolegiranog čelika za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

		Preporučeno		Maksimalno	
Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]	Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]
45	0,9	9652	115	10160	112
	1,5	8890	116	10160	115
	1,9	7100	117	9144	115
	2,7	4800	117	6096	115
	3,4	3550	117	4445	115
	4,8	2150	118	2794	115
	6,4	1500	120	1905	116
	9,5	510	122	1016	116
	12,7	510	132	635	125
	15,9	280	138	356	127
	19,1	200	140	254	131
	25,4	100	146	127	142

Tablica 8. Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za konstrukcijski čelik za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Visina gorionika od radnog komada prilikom rezanja [mm]	Početna visina probijanja		Vrijeme otklona probijanja [s]
45	0,9	1,5	3,8 mm	250% visine gorionika prilikom rezanja	0,0
	1,5				0,1
	1,9				0,3
	2,7				0,4
	3,4				0,5
	4,8				0,6
	6,4				0,9
	9,5				
	12,7				
	15,9				
	19,1				
	25,4				
	Preporuča se početak na rubu				

Za rezanje ispitnih uzoraka iz aluminija koriste se vrijednosti brzine rezanja i trajanja probijanja dane u tablicama 9 i 10. Jačina struje je ponovno 45 A.

Tablica 9. Preporučene brzine rezanja aluminija za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Preporučeno		Maksimalno	
		Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]	Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]
45	1,5	9150	116	10160	114
	1,9	8650	117	10160	116
	2,7	7100	120	9144	119

	3,4	5600	122	7112	120
	4,8	2550	123	3302	120
	6,4	2050	123	2540	120
	9,5	840	130	1067	125
	12,7	510	134	635	130
	19,1	200	143	254	138

Tablica 10. Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za aluminij za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Visina gorionika od radnog komada prilikom rezanja [mm]	Početna visina probijanja		Vrijeme otklona probijanja [s]
45	0,9	1,5	3,8 mm	250% visine gorionika prilikom rezanja	0,0
	1,5				0,1
	1,9				0,3
	2,7				0,4
	3,4				0,5
	4,8				0,6
	6,4				0,9
	9,5				
	12,7				
	19,1		Preporuča se početak na rubu		

Za rezanje ispitnih uzoraka iz nehrđajućeg čelika koriste se vrijednosti brzine rezanja i trajanja probijanja dane u tablicama 11 i 12. Jačina struje je 45 A, kao i u prethodnim slučajevima.

Tablica 11. Preporučene brzine rezanja nehrđajućeg čelika za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

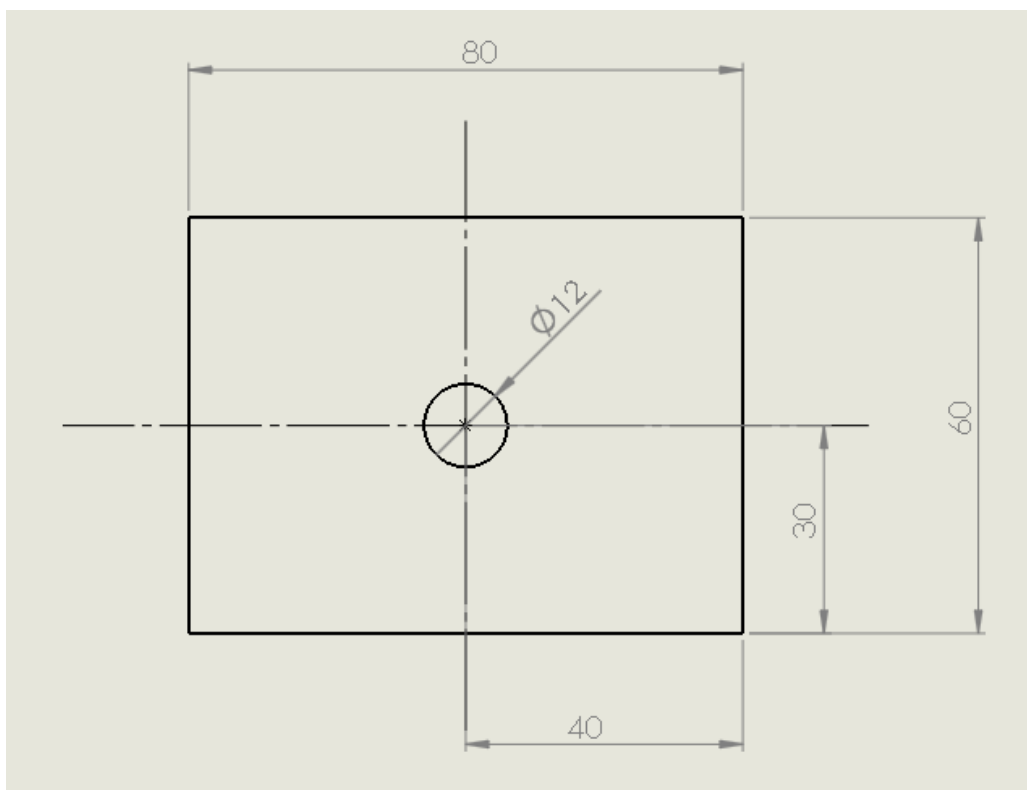
Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Preporučeno		Maksimalno	
		Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]	Brzina rezanja [mm/min]	Napon [V]
45	0,9	7600	112	10160	109
	1,5	8100	112	10160	125
	1,9	7100	118	9144	115
	2,7	4050	118	5080	116
	3,4	3050	121	3810	118
	4,8	1780	122	2159	118
	6,4	1100	124	1397	120
	9,5	760	126	813	121
	12,7	350	132	457	128
	19,1	175	136	229	131

Tablica 12. Trajanje probijanja u ovisnosti o debljini za nehrđajući čelik za napajanje Hypertherm Powermax45 i gorionik T45m [21]

Struja luka [A]	Debljina materijala [mm]	Visina gorionika od radnog komada prilikom rezanja [mm]	Početna visina probijanja		Vrijeme otklona probijanja [s]
45	0,9	1,5	3,8 mm	250% visine gorionika prilikom rezanja	0,0
	1,5				0,1
	1,9				0,3
	2,7				0,4
	3,4				0,5
	4,8				0,6
	6,4				0,8
	9,5				
	12,7				
	19,1		Preporuča se početak na rubu		

5.4. Plan pokusa

Da bi se utvrdio primarni cilj eksperimenta naveden u poglavlju 4.5.1., a to je određivanje iznosa zasjeka, ispitni se uzorci izrezuju iz različitih materijala različitih debljina. Ispitni uzorak je pravokutna pločica dimenzija 80 x 60 mm sa središnjim provrtom promjera 12 mm, prikazana na slici 35. Uzorci su istih dimenzija za svaki materijal i debljinu korištenu u sklopu eksperimenta, međutim razlikuje se njihova orijentacija, čime se utvrđuje točnost x i y osi stroja, što je ujedno i sekundarni cilj eksperimenta.



Slika 35. Prikaz ispitnog uzorka s ucrtanim dimenzijama

Cilj statističkog planiranja eksperimenta je na temelju metoda koje omogućuju sakupljanje podataka prikladnih za statističku analizu donijeti objektivne i valjane zaključke. Statističko planiranje eksperimenta obuhvaća dva problema koji se vežu uz eksperimentiranje: plan eksperimenta i statistička obrada rezultata. Prilikom koncipiranja izvođenja eksperimenta svakako valja voditi računa o tome da preveliki zahtjevi na preciznost statističkog zaključivanja ne uzrokuju prevelike troškove samoga eksperimenta. Ako eksperiment sadrži više zavisnih varijabli ili faktora, a ispituje se ukupni utjecaj faktora na zavisnu varijablu, tada se primjenjuje faktorski plan eksperimenta, kao što je slučaj kod eksperimenta opisanog u ovome radu. Dobar plan izvedbe eksperimenta je nužan da bi se za što manji broj uspješno provedenih testova mogao dobiti što veći broj kvalitetnih informacija o utjecaju nezavisnih varijabli na zavisne; to je pogotovo važno kod ispitivanja većeg broja varijabli. Prilikom izrade plana eksperimenta, istraživač mora pomno odabrati veličine koje najbolje opisuju funkcioniranje sustava i koje utječu na njegov rad i samo se na osnovi takvog plana i njegove statističke analize mogu izvesti pouzdani zaključci o djelovanju sustava u cjelini. U početnoj fazi izrade plana odabire se jedna ili više veličina koje najbolje opisuju djelovanje procesa kao sustava – ta veličina, odnosno veličine, se nazivaju zavisne varijable ili faktori. Po završetku izrade plana slijedi provođenje

eksperimenta, ispitivanja, mjerenja i slično. Zaključni dio statističkog planiranja eksperimenta jest analiziranje rezultata i formiranje zaključka o tome koji faktori u kojoj količini djeluju u značajnoj mjeri na zavisnu varijablu [23].

Eksperiment proveden u ovome radu sadrži tri zavisne varijable, te se stoga radi o faktorskom eksperimentu na tri razine, a u tablici 13 je pomoću programskog paketa *Design – Expert* prikazan plan njegovog provođenja. U planu je vidljiv redosljed izrezivanja ispitnih uzoraka iz odabranih materijala, zadani iznos zasjeka koji se unosi u računalnu jedinicu i raspored korištenih elektrodi, koji služi da bi se izbjegao utjecaj potrošenosti elektrode na rezultate mjerenja. Prema planu je predviđeno korištenje 10 setova elektrodi i sapnica koji se izmjenjuju prema zadanom rasporedu u planu pokusa, pri čemu svaki set izrezuje ukupno osam ispitnih uzoraka, osim jednog kompleta koji izrezuje ukupno devet ispitnih uzoraka. Iznosi zasjeka koji su zadani u planu pokusa nisu stvarni iznosi, već se u računalnu jedinicu stroja unosi polovica širine zasjeka. Orijehtacija navedena u tablici 13 se odnosi na položaj dužih stranica pločice u odnosu na x i y osi stroja; odnosno ako je navedena orijentacija x-y, to označava da se dulje stranice pločice izrezuju po x osi stroja, dok y-x orijentacija označava da se dulje stranice pločice izrezuju po y osi stroja. Prednost statističke obrade rezultata mjerenja je u tome što se regresijskom analizom izmjerenih odstupanja dobiva trodimenzionalna površina iz koje se može utvrditi vrijednost parametra zasjeka koja daje minimalnu ukupnu grešku za sve tri zavisne varijable. Uz mogućnost iščitavanja navedenih podataka, statističkom obradom se može dobiti i jednadžba koja opisuje promjenu zavisne varijable u ovisnosti o varijabilnim faktorima.

Tablica 13. Plan provođenja izrezivanja ispitnih uzoraka

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Broj elektrode
			A : ZASJEK [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal	
19	smjer X-y	1	0.25	2	Aluminij	10
8	smjer X-y	2	0.425	6	Konstruktivski čelik	9
22	smjer X-y	3	0.6	6	Aluminij	1
27	smjer X-y	4	0.425	4	Aluminij	10
7	smjer X-y	5	0.6	4	Konstruktivski čelik	4
10	smjer X-y	6	0.25	2	Nehrđajući čelik	6
6	smjer X-y	7	0.25	4	Konstruktivski čelik	2
20	smjer X-y	8	0.6	2	Aluminij	9
5	smjer X-y	9	0.425	2	Konstruktivski čelik	6
21	smjer X-y	10	0.25	6	Aluminij	7
11	smjer X-y	11	0.6	2	Nehrđajući čelik	3
13	smjer X-y	12	0.6	6	Nehrđajući čelik	1
9	smjer X-y	13	0.425	4	Konstruktivski čelik	3
12	smjer X-y	14	0.25	6	Nehrđajući čelik	5
18	smjer y-X	15	0.425	4	Nehrđajući čelik	3
14	smjer y-X	16	0.425	2	Nehrđajući čelik	10
4	smjer y-X	17	0.6	6	Konstruktivski čelik	8
23	smjer y-X	18	0.425	2	Aluminij	2
25	smjer y-X	19	0.6	4	Aluminij	4
2	smjer y-X	20	0.6	2	Konstruktivski čelik	2
3	smjer y-X	21	0.25	6	Konstruktivski čelik	9
17	smjer y-X	22	0.425	6	Nehrđajući čelik	5

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Broj elektrode
			A : ZASJEK [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal	
15	smjer y-X	23	0.25	4	Nehrđajući čelik	10
16	smjer y-X	24	0.6	4	Nehrđajući čelik	1
24	smjer y-X	25	0.25	4	Aluminij	9
26	smjer y-X	26	0.425	6	Aluminij	4
1	smjer y-X	27	0.25	2	Konstruktivski čelik	4
28	smjer y-X	28	0.25	2	Konstruktivski čelik	8
29	smjer y-X	29	0.6	2	Konstruktivski čelik	6
30	smjer y-X	30	0.25	6	Konstruktivski čelik	2
31	smjer y-X	31	0.6	6	Konstruktivski čelik	8
32	smjer X-y	32	0.425	2	Konstruktivski čelik	1
33	smjer X-y	33	0.25	4	Konstruktivski čelik	1
34	smjer X-y	34	0.6	4	Konstruktivski čelik	6
35	smjer X-y	35	0.425	6	Konstruktivski čelik	5
36	smjer X-y	36	0.425	4	Konstruktivski čelik	2
37	smjer X-y	37	0.25	2	Nehrđajući čelik	10
38	smjer X-y	38	0.6	2	Nehrđajući čelik	9
39	smjer X-y	39	0.25	6	Nehrđajući čelik	5
40	smjer X-y	40	0.6	6	Nehrđajući čelik	2
41	smjer y-X	41	0.425	2	Nehrđajući čelik	7
42	smjer y-X	42	0.25	4	Nehrđajući čelik	3
43	smjer y-X	43	0.6	4	Nehrđajući čelik	7
44	smjer y-X	44	0.425	6	Nehrđajući čelik	4
45	smjer y-X	45	0.425	4	Nehrđajući čelik	7

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Broj elektrode
			A : ZASJEK [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal	
46	smjer X-y	46	0.25	2	Aluminij	7
47	smjer X-y	47	0.6	2	Aluminij	3
48	smjer X-y	48	0.25	6	Aluminij	1
49	smjer X-y	49	0.6	6	Aluminij	9
50	smjer y-X	50	0.425	2	Aluminij	4
51	smjer y-X	51	0.25	4	Aluminij	6
52	smjer y-X	52	0.6	4	Aluminij	7
53	smjer y-X	53	0.425	6	Aluminij	6
54	smjer X-y	54	0.425	4	Aluminij	9
55	smjer y-X	55	0.25	2	Konstrukcijski čelik	2
56	smjer y-X	56	0.6	2	Konstrukcijski čelik	4
57	smjer y-X	57	0.25	6	Konstrukcijski čelik	5
58	smjer y-X	58	0.6	6	Konstrukcijski čelik	3
59	smjer X-y	59	0.425	2	Konstrukcijski čelik	5
60	smjer X-y	60	0.25	4	Konstrukcijski čelik	8
61	smjer X-y	61	0.6	4	Konstrukcijski čelik	5
62	smjer X-y	62	0.425	6	Konstrukcijski čelik	2
63	smjer X-y	63	0.425	4	Konstrukcijski čelik	8
64	smjer X-y	64	0.25	2	Nehrđajući čelik	10
65	smjer X-y	65	0.6	2	Nehrđajući čelik	1
66	smjer X-y	66	0.25	6	Nehrđajući čelik	5
67	smjer X-y	67	0.6	6	Nehrđajući čelik	10
68	smjer y-X	68	0.425	2	Nehrđajući čelik	8

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Broj elektrode
			A : ZASJEK [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal	
69	smjer y-X	69	0.25	4	Nehrđajući čelik	5
70	smjer y-X	70	0.6	4	Nehrđajući čelik	6
71	smjer y-X	71	0.425	6	Nehrđajući čelik	4
72	smjer y-X	72	0.425	4	Nehrđajući čelik	10
73	smjer X-y	73	0.25	2	Aluminij	3
74	smjer X-y	74	0.6	2	Aluminij	3
75	smjer X-y	75	0.25	6	Aluminij	8
76	smjer X-y	76	0.6	6	Aluminij	1
77	smjer y-X	77	0.425	2	Aluminij	9
78	smjer y-X	78	0.25	4	Aluminij	7
79	smjer y-X	79	0.6	4	Aluminij	6
80	smjer y-X	80	0.425	6	Aluminij	7
81	smjer X-y	81	0.425	4	Aluminij	8

5.5. Rezultati eksperimenta

Nakon izrezivanja svih ispitnih uzoraka, provodi se završna obrada brušenja s gornje i donje strane kutnom brusilicom, tako da se s pločica ukloni troska bez da im se mijenja vanjska geometrija i dimenzije duljine i širine. Izrezanim i obrušenim ispitnim uzorcima, prikazanima na slici 36, zatim se pomičnom mjerkom (šublerom) s preciznošću od 0,02 mm mjere vanjske dimenzije (duljina i širina, odnosno vanjske dimenzije po x i y osi) i širina provrta po x i y osi. Pomična mjerka korištena za vršenje mjerenja je prikazana na slici 37, a rezultati eksperimenta su dani u tablici 14.



Slika 36. Izrezani i obrušeni ispitni uzorci



Slika 37. Pomična mjerka proizvođača Meba preciznosti 0,02 mm

Tablica 14. Rezultati eksperimenta

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta\theta$ po x osi [mm]	$\Delta\theta$ po y osi [mm]	$\Delta\theta$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjek [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
19	smjer X-y	1	0,25	2	Aluminij	-0,16	-0,38	1,4	1,08	1,24	10
8	smjer X-y	2	0,425	6	Konstruktivski čelik	0,64	0,52	0	0,18	0,09	9
22	smjer X-y	3	0,6	6	Aluminij	0,48	0,04	-0,48	-0,66	-0,57	1
27	smjer X-y	4	0,425	4	Aluminij	0,12	0	0,74	0,58	0,66	10
7	smjer X-y	5	0,6	4	Konstruktivski čelik	0,56	0,28	-0,2	-0,28	-0,24	4
10	smjer X-y	6	0,25	2	Nehrđajući čelik	0,12	-0,44	0,98	0,68	0,83	6
6	smjer X-y	7	0,25	4	Konstruktivski čelik	-0,32	-0,38	0,48	0,32	0,4	2
20	smjer X-y	8	0,6	2	Aluminij	0,64	0,34	0,66	0,46	0,56	9
5	smjer X-y	9	0,425	2	Konstruktivski čelik	0,42	0,34	0,66	0,6	0,63	6
21	smjer X-y	10	0,25	6	Aluminij	-0,68	0,68	0,16	0,24	0,2	7
11	smjer X-y	11	0,6	2	Nehrđajući čelik	1,14	0,4	0,22	-0,02	0,1	3
13	smjer X-y	12	0,6	6	Nehrđajući čelik	-0,34	-0,76	-0,76	-0,62	-0,69	1
9	smjer X-y	13	0,425	4	Konstruktivski čelik	-0,1	-0,06	0,24	-0,22	0,01	3
12	smjer X-y	14	0,25	6	Nehrđajući čelik	-0,12	-0,82	-0,38	0,38	0	5

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ po x osi [mm]	$\Delta \emptyset$ po y osi [mm]	$\Delta \emptyset$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjek [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
18	smjer y-X	15	0,425	4	Nehrđajući čelik	-0,28	-0,04	0,22	-0,04	0,09	3
14	smjer y-X	16	0,425	2	Nehrđajući čelik	0,44	0,82	0,82	0,6	0,71	10
4	smjer y-X	17	0,6	6	Konstruktivski čelik	0,56	0	-0,58	-0,62	-0,6	8
23	smjer y-X	18	0,425	2	Aluminij	0,44	-0,28	0,96	0,68	0,82	2
25	smjer y-X	19	0,6	4	Aluminij	0,34	0,74	0,2	-0,04	0,08	4
2	smjer y-X	20	0,6	2	Konstruktivski čelik	0,6	0,68	0,46	0,08	0,27	2
3	smjer y-X	21	0,25	6	Konstruktivski čelik	-0,56	-0,38	0,1	-0,08	0,01	9
17	smjer y-X	22	0,425	6	Nehrđajući čelik	-0,8	-0,28	-0,26	-0,56	-0,41	5
15	smjer y-X	23	0,25	4	Nehrđajući čelik	-0,08	-0,5	0,54	0,38	0,46	10
16	smjer y-X	24	0,6	4	Nehrđajući čelik	-0,14	0,36	0	-0,36	-0,18	1
24	smjer y-X	25	0,25	4	Aluminij	0	0,76	1,06	0,8	0,93	9
26	smjer y-X	26	0,425	6	Aluminij	-0,28	0,2	-0,04	-0,18	-0,11	4
1	smjer y-X	27	0,25	2	Konstruktivski čelik	0,18	-0,34	1,14	0,72	0,93	4
28	smjer y-X	28	0,25	2	Konstruktivski čelik	-0,1	0,02	1,04	0,76	0,9	8
29	smjer y-X	29	0,6	2	Konstruktivski čelik	0,78	0,66	0,46	0	0,23	6

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ po x osi [mm]	$\Delta \emptyset$ po y osi [mm]	$\Delta \emptyset$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjeak [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
30	smjer y-X	30	0,25	6	Konstruktivski čelik	-0,24	-0,68	0,24	-0,12	0,06	2
31	smjer y-X	31	0,6	6	Konstruktivski čelik	0,12	0,06	-0,52	-0,72	-0,62	8
32	smjer X-y	32	0,425	2	Konstruktivski čelik	0,46	0	0,74	0,56	0,65	1
33	smjer X-y	33	0,25	4	Konstruktivski čelik	-0,54	-0,68	0,46	0,32	0,39	1
34	smjer X-y	34	0,6	4	Konstruktivski čelik	0,56	-0,04	-0,16	-0,24	-0,2	6
35	smjer X-y	35	0,425	6	Konstruktivski čelik	0,08	0,1	-0,06	-0,16	-0,11	5
36	smjer X-y	36	0,425	4	Konstruktivski čelik	0	-0,08	0,2	0,1	0,15	2
37	smjer X-y	37	0,25	2	Nehrđajući čelik	0,18	-0,12	0,96	0,98	0,97	10
38	smjer X-y	38	0,6	2	Nehrđajući čelik	0,94	0,64	0,16	0,08	0,12	9
39	smjer X-y	39	0,25	6	Nehrđajući čelik	-0,98	-0,86	0,12	-0,32	-0,1	5
40	smjer X-y	40	0,6	6	Nehrđajući čelik	0,02	-0,32	-0,6	-0,84	-0,72	2
41	smjer y-X	41	0,425	2	Nehrđajući čelik	0,18	-0,18	0,6	0,16	0,38	7
42	smjer y-X	42	0,25	4	Nehrđajući čelik	-0,7	-0,3	0,56	0,48	0,52	3
43	smjer y-X	43	0,6	4	Nehrđajući čelik	0,26	0,08	-0,1	-0,42	-0,26	7
44	smjer y-X	44	0,425	6	Nehrđajući čelik	-0,28	0,34	-0,24	-1,12	-0,68	4

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ po x osi [mm]	$\Delta \emptyset$ po y osi [mm]	$\Delta \emptyset$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjek [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
45	smjer y-X	45	0,425	4	Nehrđajući čelik	-0,64	-0,18	0,1	0	0,05	7
46	smjer X-y	46	0,25	2	Aluminij	0,02	-0,22	1,32	0,86	1,09	7
47	smjer X-y	47	0,6	2	Aluminij	0,68	0,18	0,76	0,46	0,61	3
48	smjer X-y	48	0,25	6	Aluminij	-0,28	0,26	0,18	0,5	0,34	1
49	smjer X-y	49	0,6	6	Aluminij	0,3	1,52	-0,32	-0,28	-0,3	9
50	smjer y-X	50	0,425	2	Aluminij	0,6	0,06	0,9	0,72	0,81	4
51	smjer y-X	51	0,25	4	Aluminij	-0,56	-0,52	0,98	0,62	0,8	6
52	smjer y-X	52	0,6	4	Aluminij	0,4	1	0,22	0,06	0,14	7
53	smjer y-X	53	0,425	6	Aluminij	-0,04	-0,44	0,3	-0,08	0,11	6
54	smjer X-y	54	0,425	4	Aluminij	-0,26	-0,22	0,06	0,24	0,15	9
55	smjer y-X	55	0,25	2	Konstruktivski čelik	0	-0,14	1,28	0,74	1,01	2
56	smjer y-X	56	0,6	2	Konstruktivski čelik	0,34	0,48	0,4	0	0,2	4
57	smjer y-X	57	0,25	6	Konstruktivski čelik	-0,1	-0,68	0,22	0	0,11	5
58	smjer y-X	58	0,6	6	Konstruktivski čelik	0,36	0,04	-0,48	-0,68	-0,58	3
59	smjer X-y	59	0,425	2	Konstruktivski čelik	0,38	0,1	0,62	0,68	0,65	5

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ po x osi [mm]	$\Delta \emptyset$ po y osi [mm]	$\Delta \emptyset$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjek [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
60	smjer X-y	60	0,25	4	Konstruktivski čelik	-0,44	-0,32	0,6	0,5	0,55	8
61	smjer X-y	61	0,6	4	Konstruktivski čelik	0,24	0,48	-0,24	-0,12	-0,18	5
62	smjer X-y	62	0,425	6	Konstruktivski čelik	-0,04	0,54	-0,22	-0,14	-0,18	2
63	smjer X-y	63	0,425	4	Konstruktivski čelik	0,08	0,2	0,08	0	0,04	8
64	smjer X-y	64	0,25	2	Nehrđajući čelik	-0,08	0,16	0,96	1	0,98	10
65	smjer X-y	65	0,6	2	Nehrđajući čelik	0,66	0,96	0,26	0,2	0,23	1
66	smjer X-y	66	0,25	6	Nehrđajući čelik	-0,44	-0,96	-0,32	-0,18	-0,25	5
67	smjer X-y	67	0,6	6	Nehrđajući čelik	0	0,22	-0,92	-0,96	-0,94	10
68	smjer y-X	68	0,425	2	Nehrđajući čelik	0,14	-0,02	0,66	0,64	0,65	8
69	smjer y-X	69	0,25	4	Nehrđajući čelik	-0,38	-0,32	0,66	0,22	0,44	5
70	smjer y-X	70	0,6	4	Nehrđajući čelik	0,06	0,08	-0,2	0,16	-0,02	6
71	smjer y-X	71	0,425	6	Nehrđajući čelik						4
72	smjer y-X	72	0,425	4	Nehrđajući čelik	-0,34	-0,04	0,28	0,1	0,19	10
73	smjer X-y	73	0,25	2	Aluminij	-0,14	-0,26	1,24	1,22	1,23	3
74	smjer X-y	74	0,6	2	Aluminij	0,52	0,38	0,52	0,58	0,55	3

Standardni broj	Orijentacija	Redoslijed izvođenja	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ po x osi [mm]	$\Delta \emptyset$ po y osi [mm]	$\Delta \emptyset$ (prosjek) [mm]	Broj elektrode
			A : Zasjeak [mm]	B : Debljina materijala [mm]	C : Materijal						
75	smjer X-y	75	0,25	6	Aluminij	-0,34	-0,3	0,16	0,48	0,32	8
76	smjer X-y	76	0,6	6	Aluminij	0,32	0,12	-0,36	-0,72	-0,54	1
77	smjer y-X	77	0,425	2	Aluminij	0,32	0,06	1,08	0,82	0,95	9
78	smjer y-X	78	0,25	4	Aluminij	-0,34	-0,28	0,7	0,72	0,71	7
79	smjer y-X	79	0,6	4	Aluminij	0,18	0,66	0,14	0,22	0,18	6
80	smjer y-X	80	0,425	6	Aluminij						7
81	smjer X-y	81	0,425	4	Aluminij	0,02	0,04	0,56	0,92	0,74	8

5.6. Obrada rezultata i opažanja

Statistička obrada rezultata je izvršena u programskom paketu *Design – Expert* koji je na regresijskom analizom izmjerenih vrijednosti izradio trodimenzionalne površine koje opisuju utjecaj varijabilnih faktora na zavisnu varijablu. Kao što je ranije prikazano u planu pokusa u tablici 13, varijabilni faktori u ovome eksperimentu su vrsta izrezivanog materijala, njegova debljina i uneseni iznos zaszjeka, dok je zavisna varijabla odstupanje (delta) od nazivne mjere koju bi odrezani komad trebao posjedovati. Provedena je obrada rezultata za svaki od izrezivanih materijala i to u tri slučaja, odnosno zavisna varijabla je za prvi slučaj odstupanje po x osi stroja, za drugi slučaj odstupanje po y osi stroja i za treći prosječno odstupanje promjera provrta. Obzirom na tri različita materijala koji se koriste u eksperimentu i tri promatrana slučaja odstupanja dimenzija, rezultati su prikazani na ukupno devet dijagrama. Kako se radi o faktorskom eksperimentu trećeg reda, to jest prisutna su tri varijabilna faktora, površina koja prikazuje rezultate je trodimenzionalna, a vrijednosti varijabilnih faktora su prikazane na trima osima.

5.6.1. Regresijske jednadžbe

Sva navedena odstupanja, odnosno zavisne varijable iz prethodnih poglavlja se mogu pretočiti i u matematičke izraze koje je generirao programski paket *Design – Expert*. Jednadžbe dobivene regresijskom analizom mogu približno predvidjeti koje odstupanje se može očekivati obzirom na varijabilne faktore koji se koriste pri rezanju. Ove jednadžbe također mogu poslužiti ako se želi utvrditi koliko je očekivano odstupanje ako se izrezuje materijal debljine koja nije obrađena u pokusu, primjerice 3 ili 5 mm. Promjene zavisne varijable Δx su prikazane za konstrukcijski čelik u jednadžbi 1, za aluminij u jednadžbi 2 i za nehrđajući čelik u jednadžbi 3:

$$\Delta x = 0,259153 + 1,86878 \cdot Z - 0,460063 \cdot D + 0,04973 \cdot D^2 \quad (1)$$

$$\Delta x = 0,338787 + 1,86878 \cdot Z - 0,49576 \cdot D + 0,04973 \cdot D^2 \quad (2)$$

$$\Delta x = 0,590179 + 1,86878 \cdot Z - 0,594714 \cdot D + 0,04973 \cdot D^2 \quad (3)$$

Promjene druge zavisne varijable, odnosno Δy , su prikazane za konstrukcijski čelik u jednadžbi 4, za aluminij u jednadžbi 5 i za nehrđajući čelik u jednadžbi 6:

$$\Delta y = -0,495793 + 1,82857 \cdot Z - 0,063333 \cdot D \quad (4)$$

$$\Delta y = -0,8905 + 1,82857 \cdot Z + 0,069960 \cdot D \quad (5)$$

$$\Delta y = -0,195565 + 1,82857 \cdot Z - 0,168876 \cdot D \quad (6)$$

Treća zavisna varijabla je odstupanje promjera ($\Delta\emptyset$), čija se vrijednost može izračunati za konstrukcijski čelik jednadžbom 7, za aluminij jednadžbom 8 i za nehrđajući čelik jednadžbom 9:

$$\Delta\emptyset = 1,80989 - 1,95132 \cdot Z - 0,2025 \cdot D \quad (7)$$

$$\Delta\emptyset = 2,2001 - 1,95132 \cdot Z - 0,234244 \cdot D \quad (8)$$

$$\Delta\emptyset = 1,9242 - 1,95132 \cdot Z - 0,255107 \cdot D \quad (9)$$

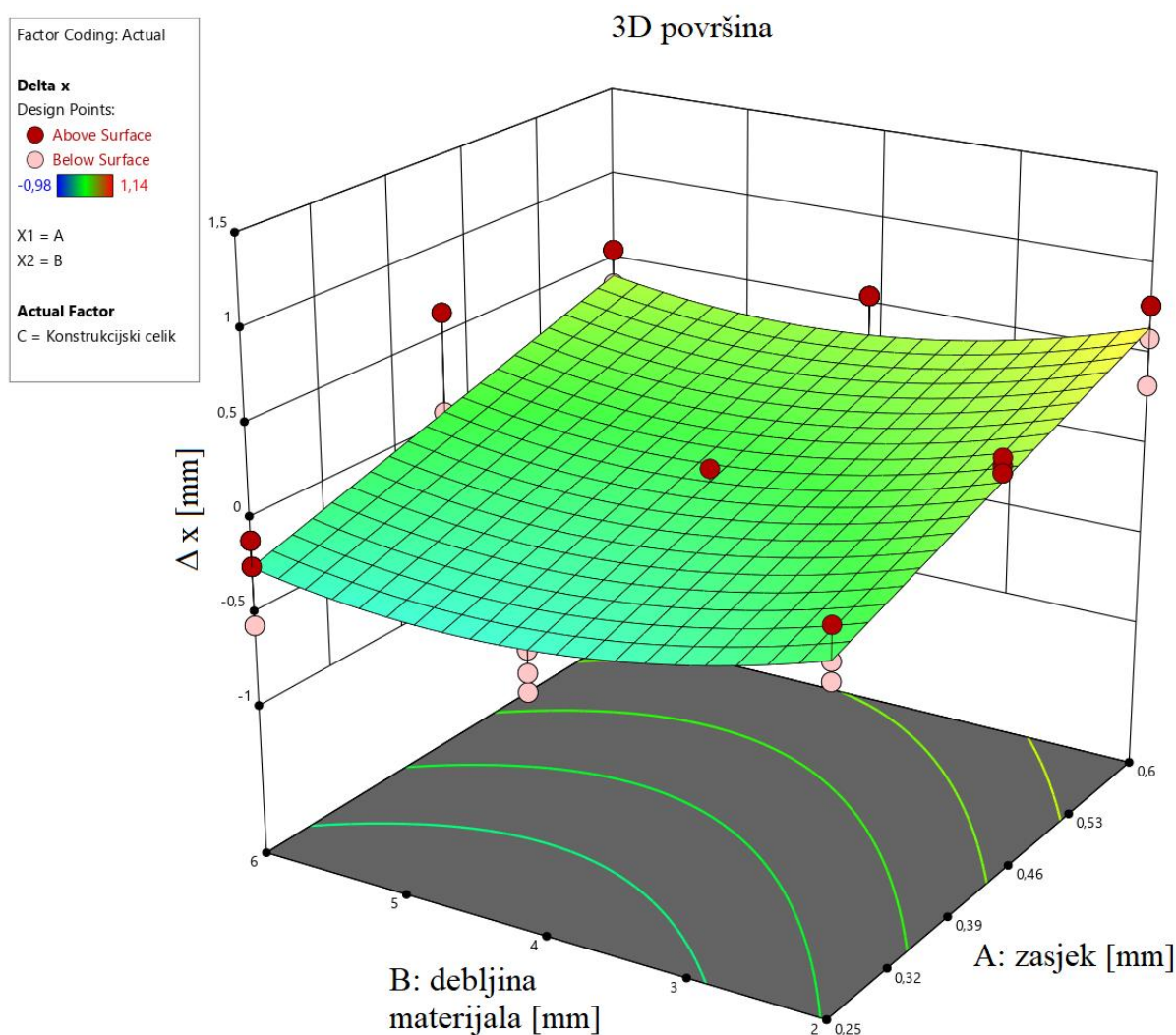
Gdje je:

Δx	mm	odstupanje po x osi stroja
Δy	mm	odstupanje po y osi stroja
$\Delta\emptyset$	mm	odstupanje promjera
D	mm	debljina materijala
Z	mm	iznos zasjeka.

5.6.2. Odstupanja po x osi stroja

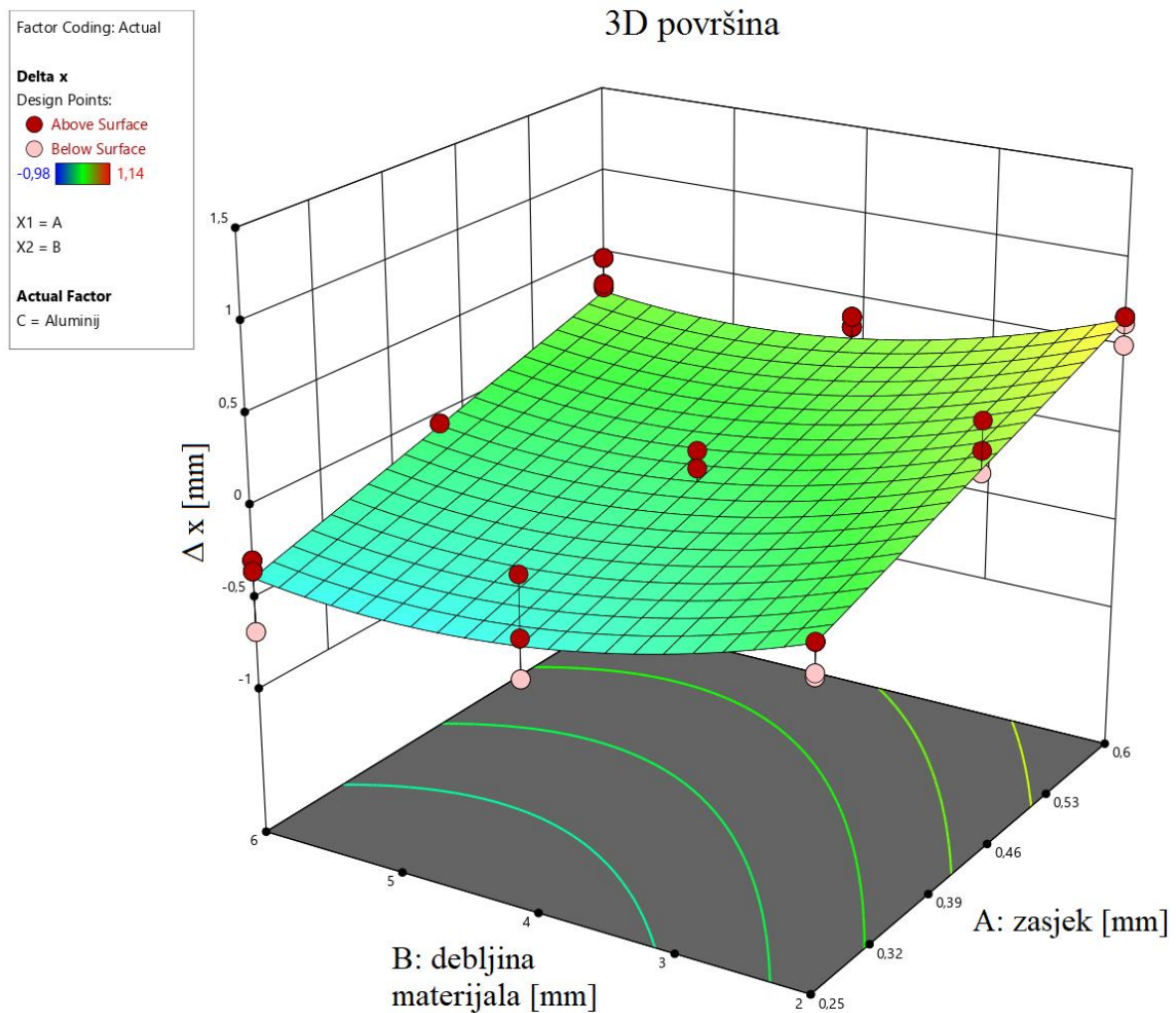
U prvom su slučaju promatrana odstupanja po x osi stroja (Δx), te su rezultati analize prikazani za konstrukcijski čelik na slici 38, za aluminij na slici 39 i za nehrđajući čelik na slici 40. Na dijagramima je plavom nijansom označeno područje negativnog odstupanja dimenzije po x osi stroja, odnosno za te varijabilne faktore je izmjerena vrijednost izrezanog komada manja od nazivne mjere, zelenim nijansama je označeno područje najmanjih odstupanja, odnosno najveće točnosti, dok je crvenom bojom označeno područje pozitivnog odstupanja dimenzije (izmjerena vrijednost je veća od nazivne). Crvene točke na dijagramu prikazuju pozitivne veličine odstupanja za to stanje pokusa, dok roze točke prikazuju negativne vrijednosti odstupanja. Trodimenzionalna površina dijagrama je rezultat aritmetičkih sredina između crvenih i rozih točaka.

Prema grafu na slici 38, najniža vrijednost zavisne varijable Δx za konstrukcijski čelik iznosi oko -0,45 mm i pojavljuje se kod čelika teorijske debljine između 4 i 5 mm i iznosa zasljeaka od 0,25 mm, dok je njena najveća vrijednost 0,6 mm i javlja se kod čelika debljine 2 mm i zasljeaka od 0,6 mm. Konstrukcijski čelici debljine 6 i 4 mm imaju i negativne i pozitivne vrijednosti Δx , ovisno o unesenoj vrijednosti varijabilnog faktora zasljeaka, dok konstrukcijski čelik debljine 2 mm ima skoro uvijek pozitivnu vrijednost Δx . Primjetne su i veće oscilacije u stanjima pokusa za vrijednost debljine 6 mm i iznos zasljeaka 0,425 mm



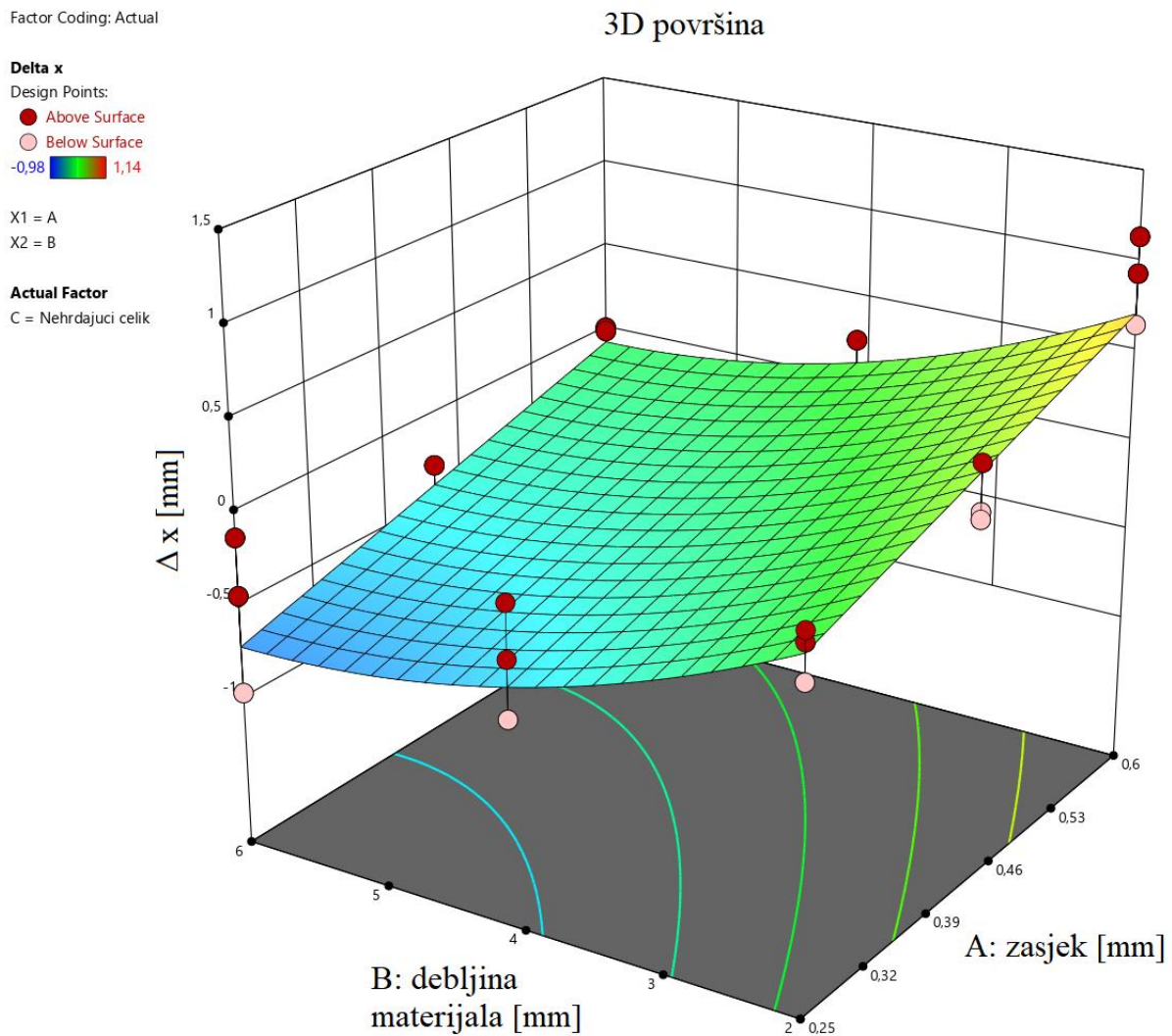
Slika 38. Odstupanja po x osi stroja za konstrukcijski čelik

Trodimenzionalni dijagram za aluminij je donekle sličan dijagramu za konstrukcijski čelik. Najniža vrijednost Δx je ponovo $-0,45$ mm i javlja se kod debljine materijala od oko 5 mm i vrijednosti zasjeka 0,25 mm, a najviša vrijednost Δx je oko 0,6 mm i javlja se kod debljine materijala 2 mm i zasjeka od 0,6 mm. Dodatna razlika u odnosu na dijagram za konstrukcijski čelik je to što su najveće oscilacije kod mjerenja zabilježene za aluminij debljine 4 mm i iznos zasjeka od 0,25 mm.



Slika 39. Odstupanja po x osi stroja za aluminij

Kod nehrđajućeg čelika se javljaju znatno drugačije vrijednosti. Najniža vrijednost Δx je -0,75 mm i javlja se kod debljine materijala od 6 mm i zasjeka od 0,25 mm, dok je najveća vrijednost Δx približno 0,65 mm i javlja se kod debljine 2 mm i zasjeka 0,6 mm. Na dijagramu za nehrđajući čelik također se može primjetiti i veći nagib trodimenzionalne površine u odnosu na prethodna dva dijagrama, a ujedno i veće oscilacije između maksimalnih i minimalnih vrijednosti zavisne varijable Δx .

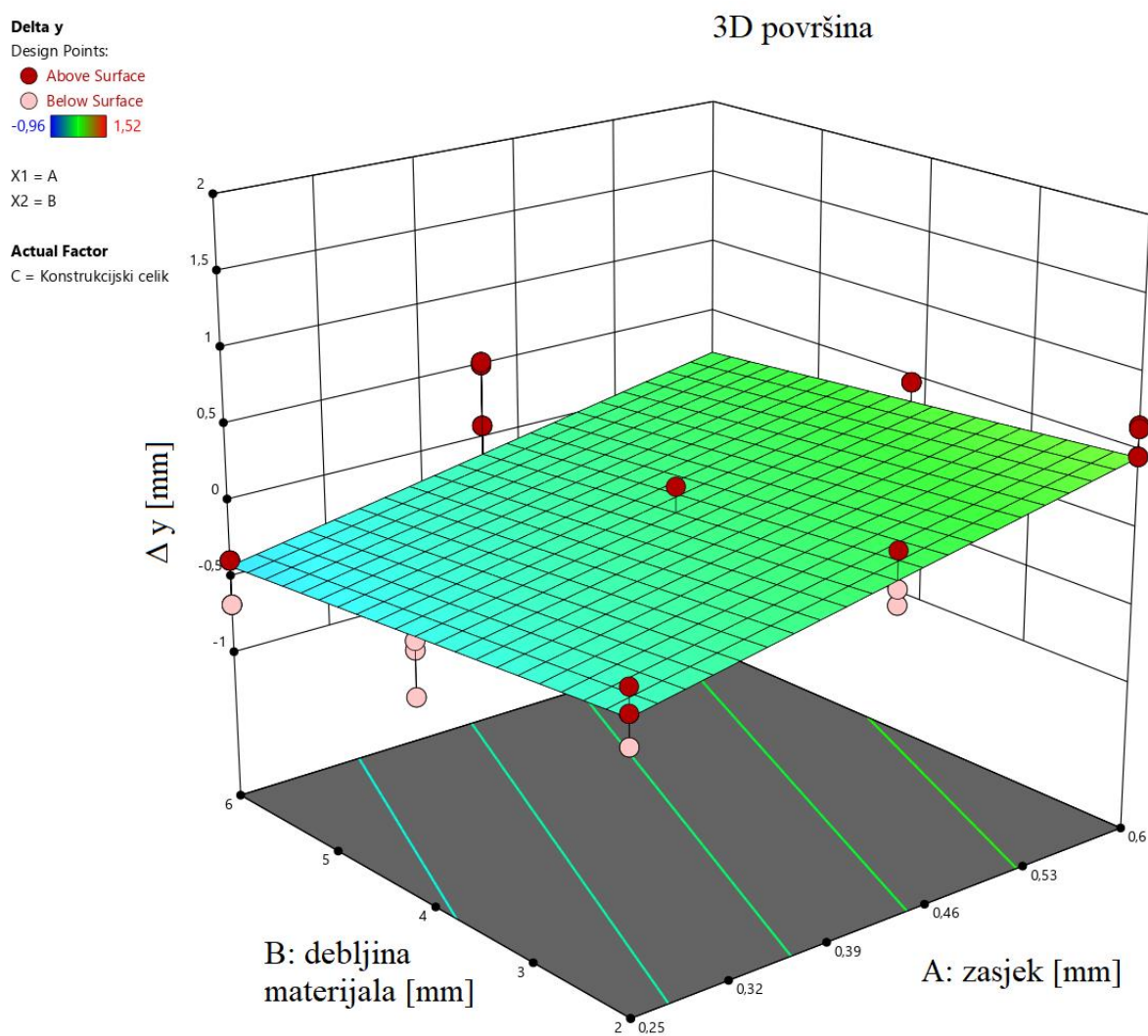


Slika 40. Odstupanja po x osi stroja za nehrđajući čelik

5.6.3. Odstupanja po y osi stroja

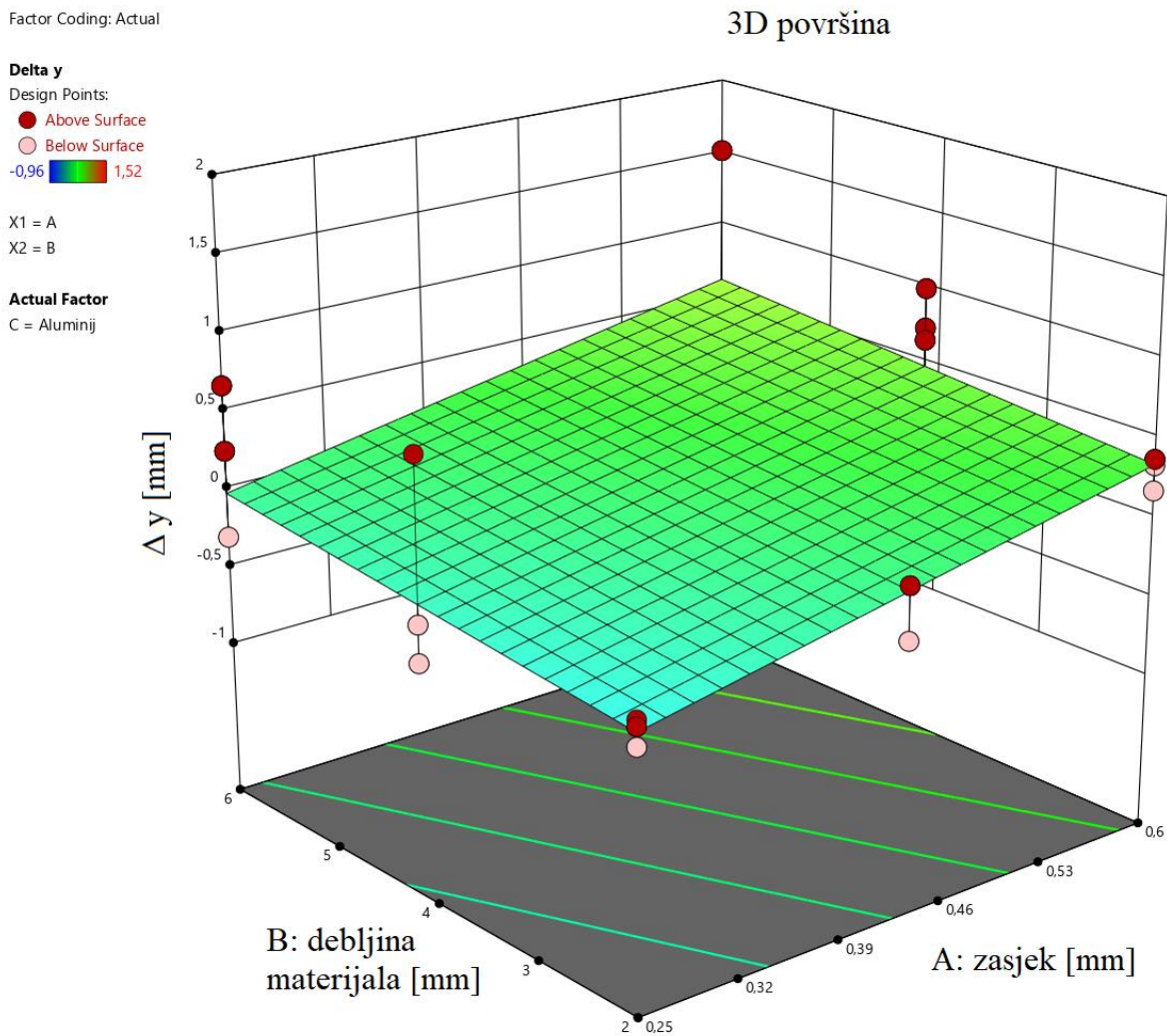
U drugom su slučaju promatrana odstupanja po y osi stroja (Δy), te su također proučavane oscilacije između pojedinih stanja pokusa. Rezultati analize su prikazani za konstrukcijski čelik na slici 41, za aluminij na slici 42 i za nehrđajući čelik na slici 43.

Oscilacije između gornjih i donjih vrijednosti Δy za konstrukcijski čelik su znatno manje nego u odnosu na x os, a ujedno je manji i nagib trodimenzionalne površine i primjetna je određena linearnost između podataka dobivenih regresijskom analizom.



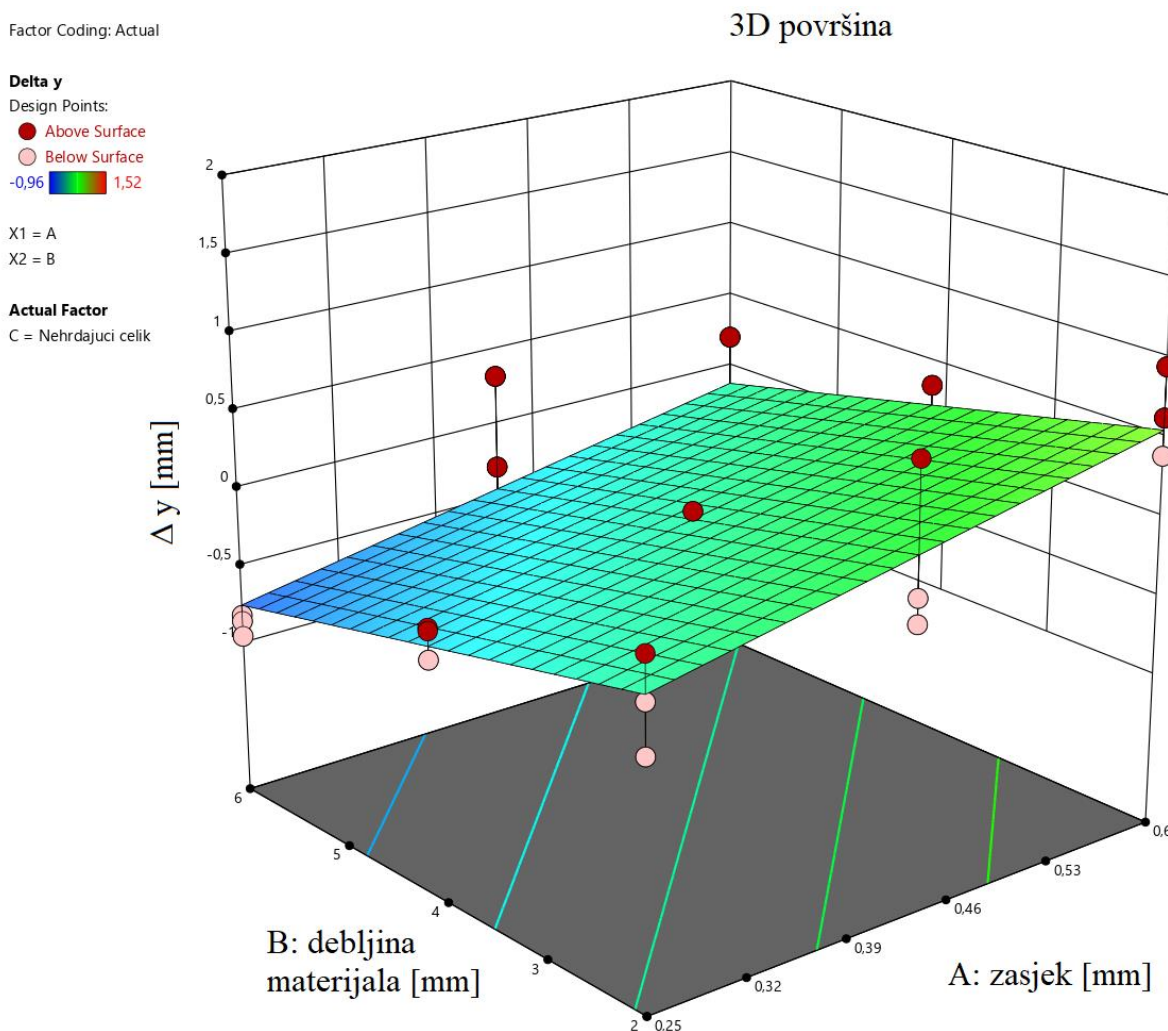
Slika 41. Odstupanja po y osi stroja za konstrukcijski čelik

I kod aluminija se primjećuje znatno manja oscilacija u izmjerenim vrijednostima odstupanja za y os stroja u odnosu na njegovu x os. Iznenadenje u rezultatima su dvije neočekivano visoke pozitivne vrijednosti odstupanja kod kombinacije varijabilnih faktora debljine 4 mm sa zasjekom 0,25 mm i debljine 6 mm sa zasjekom 0,6 mm.



Slika 42. Odstupanja po y osi stroja za aluminij

Oscilacije između izmjerenih odstupanja za y os su značajno više za nehrđajući čelik u odnosu na aluminij ili konstrukcijski čelik, kao što je slučaj i kod x osi stroja. Usprkos većim odstupanjima nego što je izmjereno za druge materijala, y os stroja ponovno pokazuje manja ukupna odstupanja u odnosu na x os i za nehrđajući čelik.



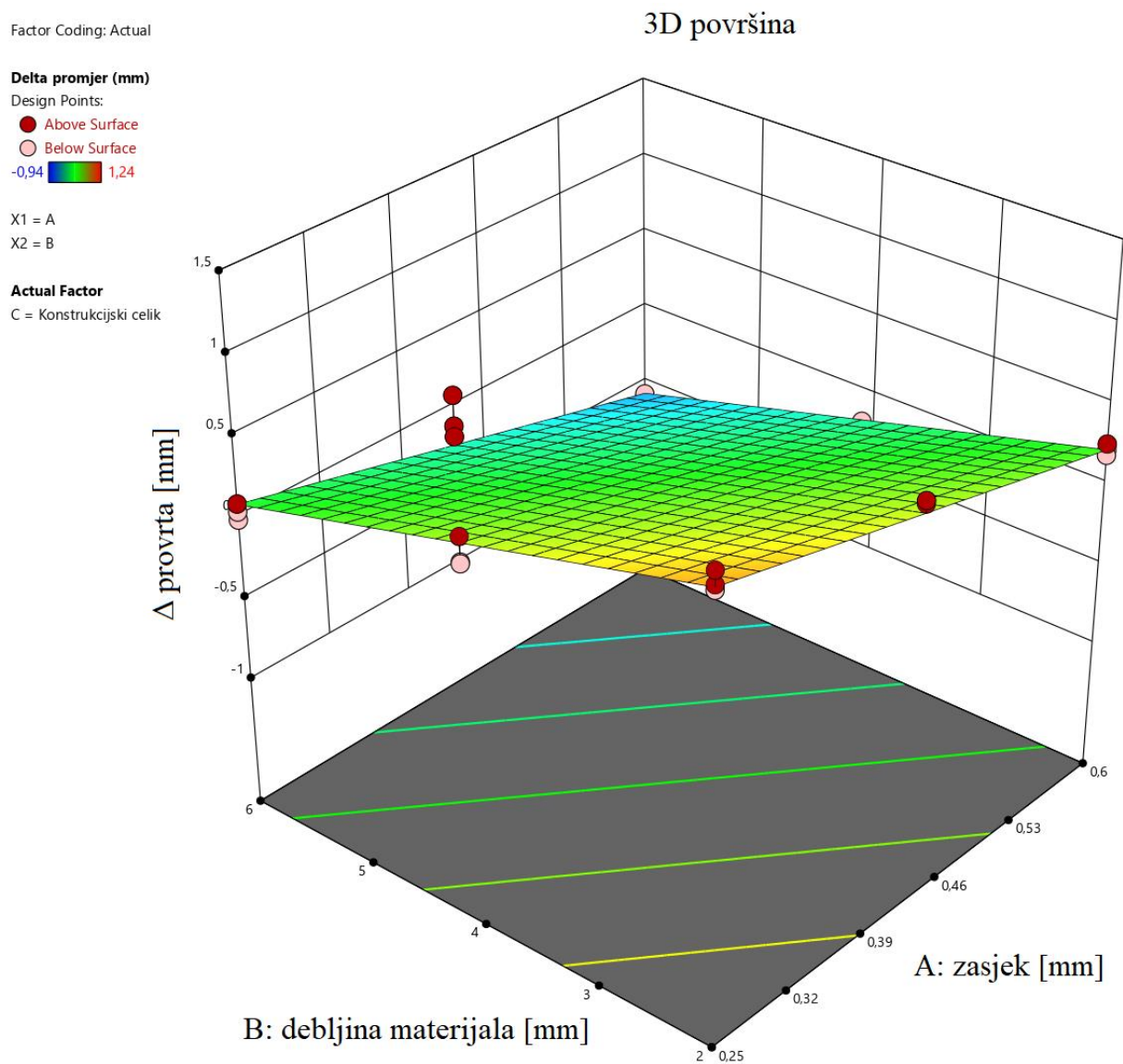
Slika 43. Odstupanja po y osi stroja za nehrđajući čelik

5.6.4. Prosječno odstupanje promjera provrta

Nakon analize odstupanja pojedinih osi stroja, ispituju se odstupanja promjera provrta ($\Delta\emptyset$). Prilikom izrade provrta na ispitnom uzorku obje osi moraju sudjelovati istovremeno da bi plazmeni luk napravio kružni pokret, stoga netočnost obiju osi stroja utječe na konačno odstupanje promjera. Nominalna vrijednost promjera provrta je 12 mm, mjerio se po x i y osi, te je zatim na temelju pojedinih odstupanja promjera po osima izračunano prosječno odstupanje.

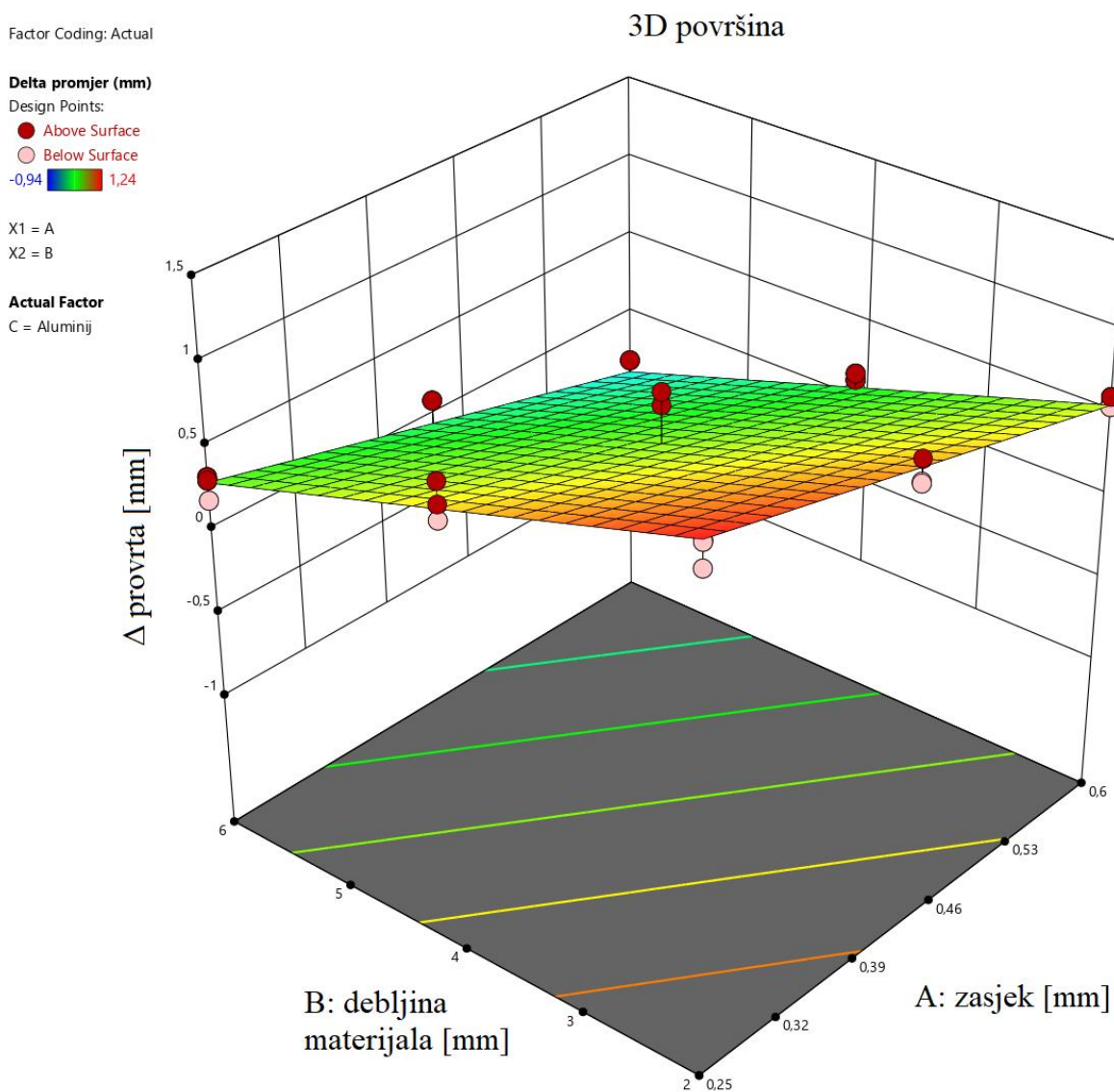
Navedena odstupanja su prikazana na slici 44 za konstrukcijski čelik, slici 45 za aluminij i na slici 46 za nehrđajući čelik.

Na slici 44 je lako uočljiva dijametralna suprotnost trodimenzionalne površine u grafu od one koja je prikazivala odstupanja po x ili y osi za konstrukcijski čelik. Iznosi zasjeka za konstrukcijski čelik 2 i 6 mm debljine koji daju relativno dobru točnost vanjskih dimenzija ispitnog uzorka, uzrokuju najveća odstupanja dimenzije promjera.



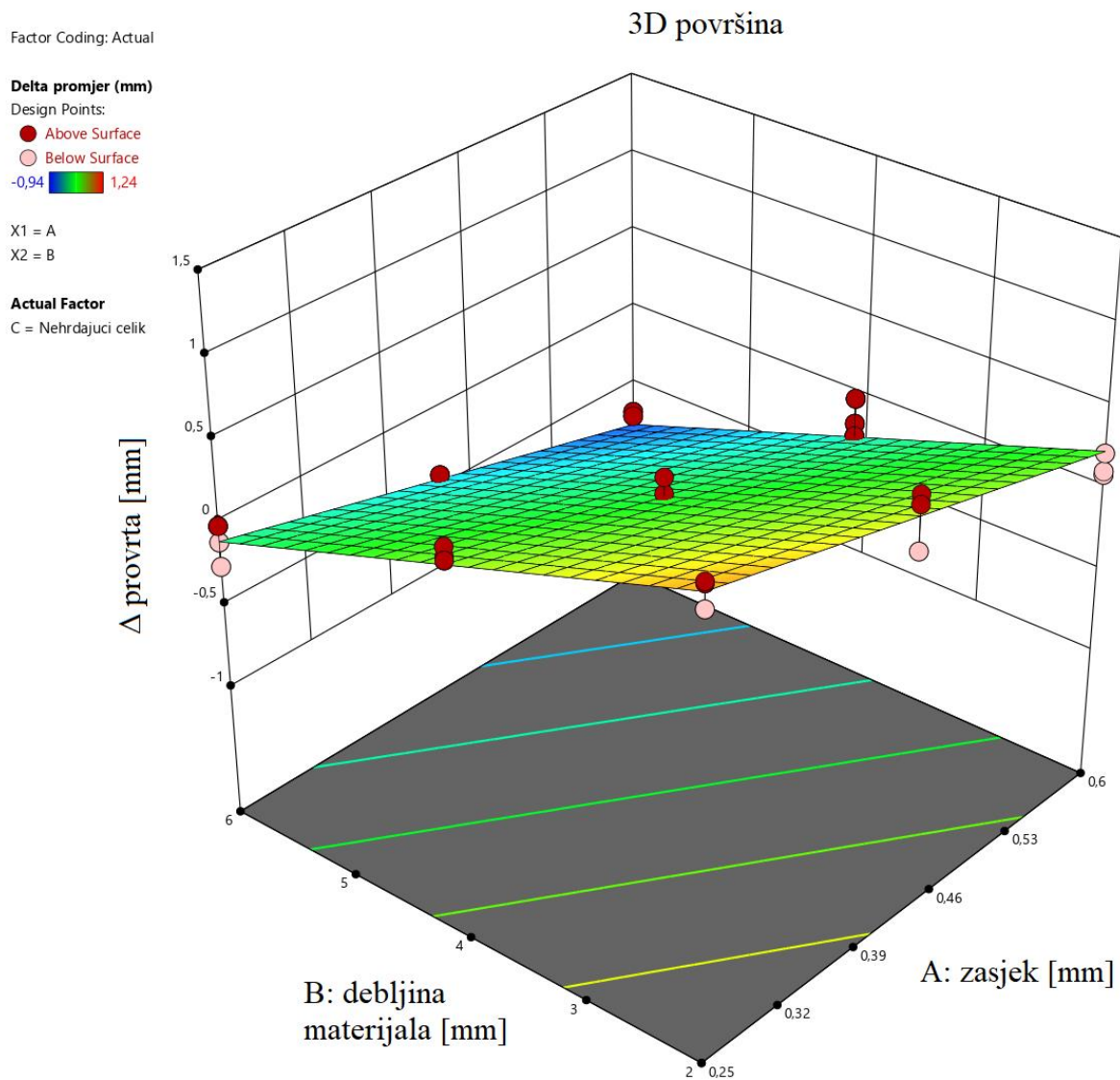
Slika 44. Prosječno odstupanje promjera za konstrukcijski čelik

Trodimenzionalna površina na slici 45 koja prikazuje odstupanja promjera za aluminij izgleda slično površini za konstrukcijski čelik sa slike 44, uz još naglašenije ekstreme odstupanja za debljinu materijala 2 mm.



Slika 45. Prosječno odstupanje promjera za aluminij

Kao i kod ranijih dijagrama za nehrđajući čelik, i u ovom slučaju on prednjači po ekstremnim iznosima negativnog odstupanja, dok mu je maksimalno pozitivno odstupanje manje od maksimalnog iznosa odstupanja kod aluminija. Ono što je specifično kod dijagrama na slici 46 jest to da su oscilacije u pojedinim stanjima pokusa znatno manje nego u prethodnim dijagramima za nehrđajući čelik.



Slika 46. Prosječno odstupanje promjera za nehrđajući čelik

5.6.5. Analiza optimalnih iznosa zasjeka

Na temelju prethodnih podataka, programski paket *Design – Expert* nudi mogućnost pronalaženja optimalne vrijednosti varijabilnog faktora zasjeka za svaki materijal i svaku debljinu. Tražen je onaj iznos zasjeka koji daje maksimalnu ukupnu točnost dimenzija obratka po x i y osi i promjera provrta. Preciznije rečeno, od programa je traženo da na trodimenzionalnoj površini iz dijagrama utvrdi za svaki materijal i debljinu točku koja ima minimalan iznos ukupnih odstupanja Δx , Δy i $\Delta \emptyset$. U tablici 15 su dani iznosi zasjeka koji daju takva odstupanja. Može se primjetiti da se za pojedine debljine i materijale više rješenja smatra optimalnim, odnosno više različitih iznosa zasjeka mogu dati odstupanja koja su za jednu dimenziju nešto veća, dok su za drugu dimenziju nešto manja.

Tablica 15. Izračunani optimalni iznosi zasjeka

Materijal	Debljina [mm]	Zasjek [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \emptyset$ [mm]
Konstrukcijski čelik	2	0,382	0,251	0,075	0,660
Konstrukcijski čelik	2	0,379	0,247	0,071	0,665
Konstrukcijski čelik	2	0,386	0,259	0,083	0,652
Konstrukcijski čelik	4	0,420	0,000	0,019	0,180
Konstrukcijski čelik	6	0,479	0,184	0,000	-0,340
Aluminij	2	0,494	0,470	0,153	0,767
Aluminij	4	0,454	0,000	0,220	0,377
Aluminij	6	0,452	0,000	0,357	-0,088
Nehrđajući čelik	2	0,372	0,294	0,146	0,689
Nehrđajući čelik	2	0,369	0,290	0,142	0,693
Nehrđajući čelik	2	0,374	0,298	0,150	0,685
Nehrđajući čelik	4	0,531	0,000	0,101	-0,133
Nehrđajući čelik	6	0,600	-0,067	-0,112	-0,777

6. ZAKLJUČAK

Po završetku statističke obrade rezultata, ustanovljene su višestruke značajke u radu CNC plazma stroja u poduzeću Medved Metali. Prvotno je uočeno da y os stroja ima značajno manja prosječna odstupanja, što je povezano s konstrukcijom stroja. Konzola koja ostvaruje gibanje po y osi sadrži dvije paralelne vodilice, s time da su obje iz jednog komada, dok gibanje po x osi stroja omogućuje također jedan par vodilica, ali svaka od njih je sačinjena spajanjem iz više komada. Odstupanja dimenzija provrta su značajno veća od odstupanja vanjskih dimenzija izrezanih komada, što je očigledna posljedica djelovanja obiju osi pri rezanju provrta i zbrajanja njihovih pojedinih netočnosti. Konstrukcijski i nehrđajući čelik pokazuju najbolju točnost za debljinu od 4 mm, dok je aluminij imao najbolje rezultate za debljinu od 6 mm. Ustanovljeni su optimalni iznosi zasjeka za izrezivane debljine, a utvrđene su i jednadžbe za predviđanje odstupanja ukoliko se izrezuju debljine koje nisu obuhvaćene eksperimentom. Sve navedene uočene značajke mogu pomoći operateru kod planiranja obrade, odnosno kod unosa iznosa zasjeka u računalnu jedinicu i pozicioniranja izrezivanih komada prema zahtjevima na dimenzijsku točnost.

Logičan nastavak istraživanja bi se mogao baviti izrezivanjem materijala debljina koje nisu obuhvaćene eksperimentom i uspoređivanja matematički izračunanih odstupanja sa stvarnima. Uz provođenje dodatnih ispitivanja, tokom eksperimenta su uočene i mogućnosti dodatne uštede vremena pri pripremi proizvodnje i povećanja točnosti stroja, kao što su:

- Provedba niveliranja stroja.
- Zamjena rešetkaste konstrukcije stola na koju se naslanjaju ploče lima u cilju smanjenja valovitosti ploča malih debljina kada se odlože na stol.
- Ažuriranje programskog paketa na upravljačkoj računalnoj jedinici, tako da posjeduje biblioteku zasjeka, što bi eliminiralo potrebu ručnog unošenja prije puštanja programa u rad.

Kao što je ranije navedeno, veća točnost stroja smanjuje utrošak vremena potrebnog za završnu obradu izrezanog komada i zavarivanje pozicija prilikom sklapanja i montaže. Uz vrijeme, povećanjem točnosti stroja štedi se i dodatan materijal prilikom završne obrade i zavarivanja. Sve navedene vremenske i materijalne uštede utječu na smanjenje troškova i povećanje efikasnosti proizvodnje, što povećava konkurentnost poduzeća na tržištu.

LITERATURA

- [1] Filetin T, Kovačićek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.
- [2] Samardžić I. Rezanje plazmom – podloge za predavanja. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu; 2015.
- [3] Whiting T. Starting From Scratch – Plasma arc cutting basics and operator guidelines. The fabricator. FMA; Rujan 2006.
- [4] Povijest plazma rezanja: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1061>, pristupljeno: 4.10.2021.
- [5] Mioč J. Optimizacija parametara pri rezanju plazmom [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [6] Ott D. What is high-precision plasma cutting, exactly? The fabricator. FMA; Svibanj 2018.
- [7] Kako funkcionira plazma rezač: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx>, pristupljeno: 5.10.2021.
- [8] Samardžić I, Stoić A, Klarić Š, Pavić J. Possibilities of cost effective plasma cutting application. 4th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries; Slavonski Brod, Hrvatska, 21.9.-24.9.2005. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu; 2005.
- [9] Osnove plazma rezanja: <https://www.esab.ca/ca/en/education/blog/the-basics-of-plasma-cutting.cfm>, pristupljeno: 12.10.2021.
- [10] Rezanje plazmenim lukom: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051>, pristupljeno: 5.10.2021.
- [11] Što je HTPAC: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-htpac>, pristupljeno: 6.10.2021.
- [12] HyPerformance plazma sustavi: <https://www.hypertherm.com/learn/about-our-products/hyperformance-plasma-cutting-systems/>, pristupljeno: 6.10.2021.
- [13] Snage napajanja za stvaranje plazmenog luka: <https://www.hypertherm.com/learn/about-our-products/powermax-plasma-cutting-and-gouging-systems/powermax-system-comparison/>, pristupljeno: 6.10.2021.

- [14] Brooks C. Improvements to CNC plasma technology. The Welder. FMA; Rujan 2007.
- [15] Preporučeni plinovi za plazma rezanje: <https://www.esab.ca/ca/en/education/blog/plasma-cutting-recommended-gases.cfm>, pristupljeno 12.10.2021.
- [16] Nemchinsky V A, Severance W S. Plasma arc cutting: speed and cutting quality. Journal of Physics D: Applied Physics. Rujan 2009. Dostupno online: stacks.iop.org/JPhysD/42/195204
- [17] Ciglar D. Sklopovi alatnih strojeva: Prigon za pomoćno gibanje – linearni motor, postolje, vodilice alatnih strojeva – podloge za predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [18] HIWIN. Linear Guideway – Technical information katalog. Tajvan; 2019.
- [19] Hypertherm. Powermax45 katalog. SAD; 2016.
- [20] GIS. Katalog. Italija; 2021.
- [21] Hypertherm. Powermax45 upute za operatera. SAD; 2013.
- [22] Što je zasjek rezanja: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm>, pristupljeno 24.10.2021.
- [23] Pfaff S, Salopek B. Primjena planiranja eksperimenata u oplemenjivanju mineralnih sirovina. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 16. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2004.