

**ANALIZA TAČNOSTI I KVALITETA OBRADNE PRI SEČENJU LASEROM****ANALYSIS OF ACCURACY AND QUALITY DURING LASER CUTTING**Aleksandra Kosanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – PROIZVODNO MAŠINSTVO**

**Kratak sadržaj** – Lasersko sečenje je napredni proces čije performanse zavise od mnogobrojnih faktora. Zbog nedostatka pouzdanih praktičnih podataka o ovim faktorima, tehnologija laserskog sečenja često nije dovoljno iskorišćena. U ovom radu je korišćena Taguchi metoda za identifikaciju optimalnih vrednosti ključnih parametara procesa, kao što su brzina sečenja, snaga lasera i pritisak pomoćnog gasa, kako bi se smanjili ugao nagiba reza i srednja aritmetička hrapavost. Predstavljena metodologija analize i optimizacije omogućava preciznije i kvalitetnije upravljanje procesom laserskog sečenja.

**Cljučne reči:** Lasersko sečenje, optimizacija parametara obrade, Taguchi metoda

**Abstract** – Laser cutting is an advanced process whose performance depends on numerous factors. Due to a lack of reliable practical data on these factors, the laser cutting technology is often underutilized. In this paper, the Taguchi method was used to identify the optimal values of key process parameters, such as cutting speed, laser power, and assist gas pressure, in order to minimize the kerf angle and arithmetic mean roughness. The presented analysis and optimization methodology enables more precise and higher-quality control of the laser cutting process.

**Keywords:** Laser cutting, machining parameters optimization, Taguchi method

**1. UVOD**

Iako je lasersko sečenje napredna tehnologija, na njenu efikasnost utiče mnoštvo faktora. Laser se široko koristi u industriji za precizno sečenje, zavarivanje, graviranje i bušenje različitih materijala. Njegova primena obuhvata automobilski, medicinski i elektronski sektor, kao i proizvodnju, gde omogućava visoku tačnost i kvalitet obrade. Ipak, nedostatak pouzdanih praktičnih podataka o ovim faktorima često dovodi do suboptimalne upotrebe ove tehnologije, ograničavajući njen puni potencijal [1].

Brojni autori posvetili su se istraživanju uticaja ulaznih parametara na izlazne performanse obrade. Jedno od takvih detaljnih istraživanja, koje je obuhvatilo proučavanje uticaja parametara na hrapavost površine pri laserskoj obradi nerđajućeg čelika 304, sprovela je grupa istraživača predvođena Vikasom [2].

Njihovo istraživanje, koje kombinuje eksperimentalne analize sa metodom odzivne površine, omogućilo je du-

binsko ispitivanje odnosa između parametara obrade. Rezultati su pokazali da frekvencija impulsa, snaga lasera, brzina sečenja, kao i interakcije između određenih parametara, značajno utiču na hrapavost površine. Primenom metoda višekriterijumske optimizacije zasnovane na relacionoj analizi u radu istraživani su parametri sečenja vlaknastim laserom čelika nerđajućeg tipa AISI 304L debljine 20 mm [3]. Korišćenjem Taguchi tehnike pojedinačno su optimizovane brzina sečenja, fokalna pozicija, frekvencija i radni ciklus, uz istovremenu optimizaciju hrapavosti površine i širine sečenja. Ova istraživanja doprinose razumevanju procesa laserskog sečenja debelih nerđajućih čeličnih materijala i može imati značajnu primenu u industriji.

U ovom radu [4], autori su proučili uticaj različitih parametara laserskog sečenja na kvalitet površine i širinu reza metala. Poseban fokus bio je na ključnim faktorima ovog tehnološkog procesa, istražujući kako promene u parametrima mogu uticati na konačna svojstva obrađenih materijala. Detaljno su razmotrene karakteristike laserskog sečenja, uključujući brzinu sečenja, snagu lasera i osobine materijala, sa ciljem postizanja optimalne ravnoteže između preciznosti sečenja, kvaliteta površine i širine reza. Rad takođe pruža uvid u moguće izazove i ograničenja koja se mogu javiti tokom procesa laserskog sečenja metala.

Pregled literature pokazuje da su u većini istraživanja analizirani uticaji dva, tri ili četiri faktora procesa (najčešće: snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa) na jednu, dve ili tri karakteristike procesa, pri čemu su najčešće razmatrani kvalitet reza, širina reza, hrapavost i zona uticaja toplote (HAZ). Eksperimentalni rezultati pokazuju da različiti faktori imaju različite efekte na performanse procesa u različitim intervalima variranja. Dosadašnja istraživanja su se pretežno fokusirala na sečenje metala, polimernih i kompozitnih materijala, kao i keramike. Pregled literature takođe ukazuje da je istraživanje laserske obrade i dalje aktuelno, s obzirom na stalni razvoj tehnologije i potrebu za unapređenjem procesa kako bi se postigle bolje performanse i kvalitet.

U ovom istraživanju detaljno je opisan postupak laserskog sečenja, sa posebnim naglaskom na analizu tačnosti i kvaliteta obrade. U okviru eksperimentalnog istraživanja, na mašini je izrađeno 9 uzoraka od niskougljeničnog čelika, poznatog kao crni lim sa oznakom SRPS EN 10130:2011. Cilj eksperimenta bio je icesanje 9 uzoraka koristeći različite parametre na mašini, uključujući snagu lasera, brzinu sečenja i pritisak pomoćnog gasa. Za analizu i optimizaciju parametara primenjena je Taguchi metoda, koja je korišćena za optimizaciju izlaznih

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dragan Rodić.**

performansi, srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine i ugla nagiba reza. Eksperimenti su sprovedeni koristeći Taguču ortogonalni niz  $L_9 (3^4)$  za lasersko sečenje crnog lima. Posmatran je uticaj promena brzine, snage lasera i pritiska pomoćnog gasa na kvalitet reza. Takođe, izvršena je analiza rezultata pomoću ANOVA metode.

## 2. MATERIJAL I METODE

Sečenje materijala je izvedeno na laserskoj mašini "Bystar 3015" poznatoj u industriji zbog svoje preciznosti i efikasnosti. Osnovne karakteristike mašine su: veličina radnog prostora: 3000 x 1500 mm, maksimalna masa obratka: 890 kg, maksimalna debljina obratka: 20 mm, snaga lasera: 3500W.

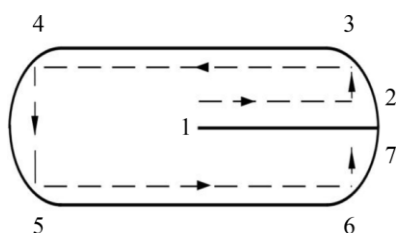
Eksperimenti su izvršeni na toplovaljanom limu od niskougleničnog čelika, u praksi poznatijem kao crni lim, oznake S235JR (1.0330) prema SRPS EN 10130:2011. Osnovne mehaničke karakteristike ovog čelika su: zatezna čvrstoća  $360 \div 510$  MPa, granica razvlačenja 235 MPa, tvrdoća  $104 \div 154$  HB, modul elastičnosti 210 GPa. Osnovni hemijski sastav je: Fe ( $\leq 98,5\%$ ), C ( $0,17 \div 0,20\%$ ), Mn ( $\leq 1,4\%$ ), Si ( $\leq 0,035\%$ ), P ( $\leq 0,045\%$ ), S ( $\leq 0,045\%$ ).

Proces je izveden na 9 uzoraka s varijacijama u parametrima: snazi lasera, brzini sečenja i pritisku pomoćnog gasa. Zbog složenosti laserskog sečenja, različiti faktori mogu značajno uticati na kvalitet reza. Na osnovu literature [5] i iskustava operatera, ključni parametri su: snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa. Pri odabiru vrednosti za ove parametre uzete su u obzir preporuke proizvođača, ograničenja mašine i karakteristike materijala. S obzirom na kompleksnost odnosa između ulaznih parametara i karakteristika reza, primenjena su tri nivoa varijacije za svaki faktor kako bi se postigao potpuni rez materijala debljine 3 mm.

Tabela 1. Vrednosti ulaznih faktora procesa laserskog sečenja

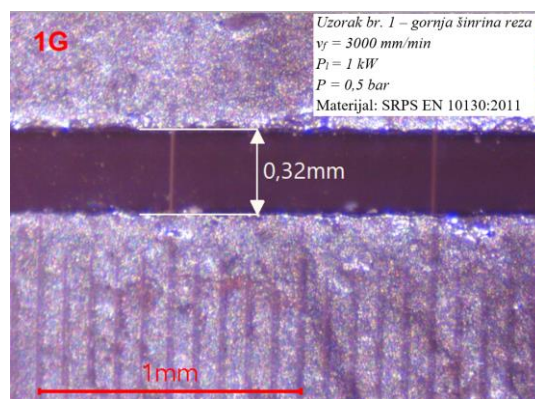
Faktori procesa	Jedinica	Nivo		
		1	2	3
Brzina sečenja, $v_f$	(m/min)	3000	3400	3800
Snaga lasera, $P_l$	(kW)	1	1,5	2
Pritisak pomoćnog gasa, $P$	(MPa)	0,5	0,7	1

Proces laserskog sečenja počinje bušenjem otvora, pozicija 1, zatim kretanjem rezne glave po zadatoj konturi, slika 1.



Slika 1. Prikaz putanje sečenja uzorka

Kao indikator tačnosti procesa laserskog sečenja korišćen je ugao nagiba reza koji se dobija računskim putem merenjem gornje i donje širine reza. Merenje je obavljeno pomoću mikroskopa Euromex Nexius Zoom EVO sa digitalnom kamerom CMEX-5 Pro, koja omogućava visoku preciznost merenja od 0,01 mm sa skaliranjem 1 DIV = 0,01 mm, slika 2. Ova visoka rezolucija omogućava detaljnu analizu površine sečenja, što je važno za postizanje visokog kvaliteta proizvoda.



Slika 2. Prikaz merenja širine reza

Hrapavost površine reza je ocenjena koristeći srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$ . Merenja su izvršena pomoću instrumenta Mitutoyo surfest SJ-210, koji radi po principu povlačenja mernog pipka po površini reza i detektovanja neravnina, slika 3. Ovi rezultati se mogu lako obraditi i kategorizovati putem povezivanja uređaja sa računarnom. Mašina se sastoji od stege za fiksiranje materijala, osnovne strukture mašine, mernog stuba i uređaja s mernim pipkom.



Slika 3. Prikaz merenja površinske hrapavosti uzorka na instrumentu Mitutoyo surfest SJ-210

U radu je korišćena Taguču metoda za jednokriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara laserskog sečenja, sa ciljem poboljšanja kvaliteta i smanjenja troškova. Taguču metoda se fokusira na sužavanje parametara oko nominalnih vrednosti, pružajući sistematski pristup optimizaciji bez potrebe za matematičkim modelima. Primena Taguču ortogonalnog niza  $L_9 (3^4)$  omogućila je analizu uticaja varijacija u parametrima, kao što su snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa, na kvalitet reza crnog lima debljine 3 mm.

Rezultati analize prikazali su uticaj ulaznih faktora sa intervalom poverenja od 95%.

Tabela 2. Tagučni ortogonalni niz  $L_9$  ( $3^4$ ) plan eksperimenta i rezultati merenja

R. br.	Faktor			Merene veličine			
	$v_f$ mm/min	$P_l$ kW	$P$ bar	$w_g$ mm	$w_d$ mm	$\alpha$ °	$R_a$ μm
1.	3000	1	0,5	0,35	0,45	0,96	0,68
2.	3000	1,5	0,7	0,47	0,33	1,34	1,1
3.	3000	2	1	0,46	0,33	1,24	1,43
4.	3400	1	0,7	0,3	0,37	0,67	0,96
5.	3400	1,5	1	0,44	0,4	0,38	1,45
6.	3400	2	0,5	0,48	0,43	0,48	1,48
7.	3800	1	1	0,31	0,35	0,38	0,89
8.	3800	1,5	0,5	0,42	0,34	0,76	1,31
9.	3800	2	0,7	0,47	0,37	0,96	3,05

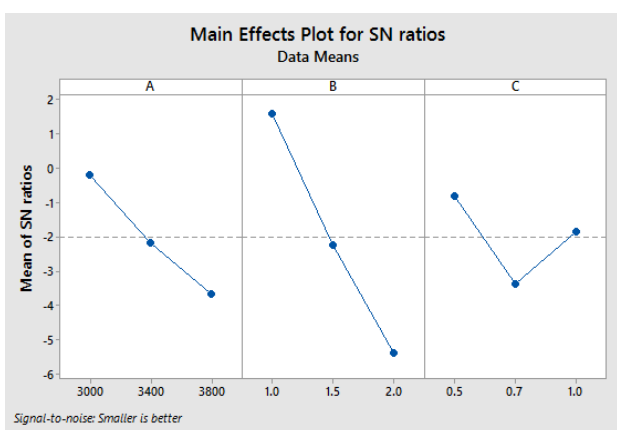
### 3. ANALIZA REZULTATA

U skladu sa tabelom 2., na osnovu kriterijuma "manje je bolje", izračunate su  $S/N$  vrednosti za svaki nivo ulaznih parametara procesa laserskog sečenja. Rezultati su predstavljeni u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti  $S/N$  odnosa za parametar hrapavosti  $R_a$

Redni broj	Faktori	$S/N$ odnos			max - min	Rang
		Nivoi				
		1	2	3		
1.	A - $v_f$	-0,20	-2,17	-3,67	3,47	2
2.	B - $P_l$	1,58	-2,23	-5,39	6,97	1
3.	C - $P$	-0,81	-3,38	-1,85	2,57	3

Prema analizi tabele 3. i grafika prikazanog na slici 4., izvršena je procena uticaja ulaznih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine. Rezultati ukazuju da snaga lasera ima najveći uticaj na hrapavost reza, dok brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa pokazuju manji uticaj.



Slika 4. Grafik glavnih uticaja  $S/N$  vrednosti na parametar hrapavosti  $R_a$

Zaključeno je da optimalna kombinacija za postizanje minimalne hrapavosti obuhvata brzinu sečenja od 3000 mm/min, snagu lasera od 1 kW i pritisak gasa od 0,5 bara. Prema Tagučijevoj metodi, ova kombinacija daje  $S/N$  odnos od 4,59 i predviđenu hrapavost od 0,32

mikrometra, što garantuje visok kvalitet reza. Optimalni parametri iz tabele 3. i slike 4. su: A (nivo 1), B (nivo 1), C (nivo 1), dok je optimalno podešavanje za hrapavost  $R_a$  prikazano u tabeli 4.

Tabela 4. Optimalno podešavanje ulaznih faktora za parametar hrapavosti  $R_a$

Ulazni parametri	Nivo	Podešavanje parametara	$R_a$ dobijeno primenom Tagučij metode
A - $v_f$	1	3000	$S/N=4,59$ $R_a=0,32$
B - $P_l$	1	1	
C - $P$	1	0,5	

U tabeli 5. prikazana je početna ANOVA analiza srednje aritmetičke hrapavosti reza pri sečenju crnog lima debljine 3 mm. Rezultati pokazuju da snaga lasera ima najveći uticaj na hrapavost, sa učešćem od 51,97%. Brzina sečenja je na drugom mestu, sa uticajem od 18,63%, dok pritisak gasa ima najmanji uticaj, od 13,12%. S obzirom na to da su u analizu uključena samo tri faktora (četvrta kolona iz Tagučij plana  $L_9$  ( $3^4$ ) je isključena iz analize) što je dovelo do procentualnog učešća greške od 16,28%. Analiza se smatra uspešnom kada je procenat greške manji od 50.

Tabela 5. ANOVA analiza za parametar hrapavosti  $R_a$

Faktor	Stepen	Suma kvadrata	Varijacija	F test	Procenat %
A	2	0,71	0,36	1,16	18,63
B	2	1,98	0,99	3,23	51,97
C	2	0,50	0,25	0,81	13,12
Greška	2	0,61	0,31		16,28
Ukupno	8	3,81			

Prikazana ANOVA analiza potvrđuje rezultate dobijene primenom Tagučij metode, ističući da su snaga lasera i brzina sečenja ključni faktori koji utiču na hrapavost reza, dok pritisak pomoćnog gasa igra manju, ali i dalje relevantnu ulogu u procesu.

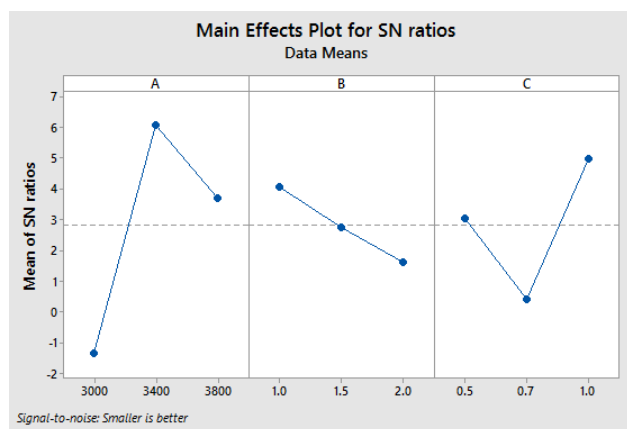
Analizom podataka iz tabele 2. i vrednosti  $S/N$  odnosa za svaki nivo ulaznih parametara procesa laserskog sečenja, procenjen je uticaj pojedinačnih faktora na ugao nagiba reza. Rezultati, prikazani u tabeli 6. i grafiku sa slike 5., pokazuju da brzina sečenja ima najveći uticaj, dok su pritisak pomoćnog gasa i snaga lasera manje značajni.

Tabela 6.  $S/N$  vrednosti faktora za ugao nagiba reza  $\alpha$

Redni broj	Faktori	$S/N$ odnos			max - min	Rang
		Nivoi				
		1	2	3		
1.	A - $v_f$	-1,35	6,09	3,71	7,44	1
2.	B - $P_l$	4,08	2,75	1,62	2,46	3
3.	C - $P$	3,04	0,43	4,98	4,55	2

Na osnovu grafičkih prikaza sa slike 5., vrednosti  $S/N$  odnosa i analize ugla nagiba krive, preporučuje se optimalna kombinacija parametara: brzina sečenja 3400 mm/min, snaga lasera 1 kW i pritisak gasa 1 bar. Ova kombinacija, prema Tagučijevoj metodi, daje  $S/N$  odnos

od 9,51 i predviđeni ugao nagiba reza od 0,25 stepeni. Takva konfiguracija ne samo da omogućava precizno i efikasno sečenje, već i minimizuje nepravilnosti na površini reza, što je ključno za postizanje visokog kvaliteta finalnog proizvoda.



Slika 5. Grafik glavnih uticaja S/N vrednosti na ugao nagiba reza  $\alpha$

Optimalna kombinacija nivoa faktora koja minimizuje ugao nagiba reza, prema tabeli 7., iznosi A (nivo 2), B (nivo 1) i C (nivo 3), što predstavlja najpouzdaniji set za postizanje maksimalnih performansi u procesu laserskog sečenja.

Tabela 7. Optimalno podešavanje ulaznih faktora za ugao nagiba reza  $\alpha$

Ulazni parametri	Nivo	Podešavanje parametara	$\alpha$ dobijeno primenom Taguči metode
A - $v_f$	2	3400	S/N=9,51 $\alpha=0,25$
B - $P_l$	1	1	
C - $P$	3	1	

ANOVA analiza iz tabele 8. potvrđuje da brzina sečenja dominira sa 70,2% uticaja na ugao nagiba reza, dok pritisak pomoćnog gasa doprinosi sa 16,83%, a snaga lasera sa 7,92%. Ovi podaci jasno ukazuju na ključnu ulogu brzine sečenja u optimizaciji procesa za postizanje minimalnog ugla nagiba reza.

Tabela 8. ANOVA analiza za ugao nagiba reza

Faktor	Stepen	Suma kvadrata	Varijacija	F test	Procenat %
A	2	0,71	0,36	17,51	70,2
B	2	0,08	0,04	1,93	7,92
C	2	0,17	0,09	4,28	16,83
Greška	2	0,04	0,02		
Ukupno	8	1,01			

Snaga lasera najviše utiče na hrapavost reza jer direktno određuje količinu prenete energije. Optimalno podešena snaga obezbeđuje bolje topljenje materijala, smanjujući nepravilnosti i rezultira bolji kvalitet obrade, dok prevelika snaga može izazvati pregrevanje i oštećenja. Brzina sečenja smanjuje vreme interakcije lasera i

materijala – brže sečenje može dovesti do manje kontrole i veće hrapavosti reza. Pritisak pomoćnog gasa uklanja rastopljeni materijal iz zone sečenja. Viši pritisak poboljšava uklanjanje materijala, ali prevelik pritisak destabilizuje proces i povećava hrapavost.

Brzina sečenja je ključna za ugao nagiba reza jer prebrzo sečenje smanjuje ravnomernost prenosa energije, povećavajući nagib. Niža brzina omogućava stabilnije sečenje i manji nagib. Pritisak pomoćnog gasa takođe utiče na ugao nagiba reza. Optimalan pritisak daje ravnomerno uklanjanje materijala, dok prevelik ili premali pritisak povećava nagib. Snaga lasera najmanje utiče, ali veća snaga omogućava dublje sečenje, dok preniska snaga može povećati nagib reza.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata, optimalna kombinacija faktora za smanjenje srednje aritmetičke hrapavosti reza je brzina sečenja (A) na nivou 1, snaga lasera (B) na nivou 1 i pritisak pomoćnog gasa (C) na nivou 1, što odgovara snazi od 1 kW, brzini od 3000 mm/min i pritisku od 0,5 MPa. Za minimizaciju ugla nagiba reza, optimalni parametri su brzina sečenja (A) na nivou 2, snaga lasera (B) na nivou 1 i pritisak gasa (C) na nivou 3, što odgovara brzini od 3400 mm/min, snazi od 1 kW i pritisku od 1 bar. ANOVA analiza pokazuje da snaga lasera ima najveći uticaj na hrapavost reza sa 51,97%, dok brzina sečenja i pritisak gasa utiču sa 18,63% i 13,12%. Za ugao nagiba reza, brzina sečenja je dominantna sa 70,2%, dok pritisak gasa i snaga lasera imaju manji uticaj, sa 16,83% i 7,92%. Zaključak je da laserska obrada, uz optimizaciju parametara, može značajno poboljšati preciznost i kvalitet, zadovoljavajući visoke standarde industrije.

#### 5. LITERATURA

- [1] M. Gostiurović, "Nekonvencionalni postupci obrade", Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [2] Magdum, V. B., V. M. Nandedkar, and A. D. Vibhute, "Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 59, pp. 540-546, 2022.
- [3] D. Milovanović, A. Milosavljević, Ž. Radovanović, and R. Jovičić, "Laser treatments of Nimonic 263 nickel-based superalloy," *\*Zastita Materijala\**, Vol. 60, No. 1, pp. 26-43, 2019.
- [4] F. A. Al-Sulaiman, B. S. Yilbas, and M. Ahsan, "CO2 laser cutting of a carbon/carbon multi-lamelled plain-weave structure," *\*Journal of Materials Processing Technology\**, Vol. 173, No. 3, pp. 345-351, 2006.
- [5] M. Madić, "Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije," Ph.D. dissertation, 2013.

#### Kratka biografija:

**Aleksandra Kosanović** rođena je u Zvorniku 2000. godine. Diplomirala je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na smeru Proizvodno mašinstvo, 2023. godine. Master rad iz oblasti Proizvodnog mašinstva – „Analiza tačnosti i kvaliteta obrade pri sečenju laserom“, odbranila je 2024. godine.

Kontakt: kosanovic00@gmail.com