

Анализа радијуса контуре реза применом методе одзивне површине***Analysis of the Cut Edge Contour Radius Using Response Surface Methodology***

Марко Зекић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Кратак садржај – Квалитет ласерског сечења у великој мери зависи од избора процесних параметара, који директно утичу на геометријску тачност обрађених делова. У овом раду анализиран је утицај брзине сечења, снаге ласера и притиска помоћног гаса на радијус контуре реза применом методе одзивне површине (RSM). Експериментална истраживања спроведена су на машини Glorystar GS4020 над челиком EN 10130. За планирање експеримената примењен је Box–Behnken дизајн, на основу којег је развијен математички модел процеса и анализиран утицај процесних параметара на радијус контуре реза. Добијени резултати омогућавају боље разумевање утицаја процесних параметара на радијус контуре реза и представљају основу за развој поузданих модела за предвиђање геометријске тачности процеса ласерског сечења.

Кључне речи: Ласерско сечење, радијус контуре реза, метода одзивне површине, моделовање процеса

Abstract – The quality of laser cutting largely depends on the selection of process parameters, which directly affect the geometric accuracy of machined parts. This paper investigates the influence of cutting speed, laser power, and assist gas pressure on the cut contour radius using Response Surface Methodology (RSM). Experimental research was conducted on a Glorystar GS4020 laser cutting machine using EN 10130 steel sheets. A Box–Behnken experimental design was applied to develop a mathematical model and analyze the influence of process parameters on the cut contour radius. The obtained results provide a better understanding of the influence of process parameters on the cut contour radius and establish a basis for developing reliable models for predicting the geometric accuracy of the laser cutting process.

Keywords: Laser cutting, cut contour radius, response surface methodology, process modelling

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Драган Родић.

1. УВОД

Ласер представља акроним од енглеског израза *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, што у преводу означава појачавање светлости стимулисаном емисијом зрачења. Захваљујући својим јединственим

карактеристикама, као што су монохроматичност, кохерентност и висока усмереност зрака, ласерско зрачење може се фокусирати на веома малу површину, чиме се остварује изузетно велика густина енергије. Управо ове особине омогућиле су да ласерска технологија постане један од најзначајнијих алата у савременој производњи [1].

Током последњих неколико деценија ласерска технологија доживела је интензиван развој и нашла широку примену у различитим гранама индустрије. Посебан значај има у аутомобилској, ваздухопловној, електронској, медицинској и машинској индустрији, где се од производних процеса захтевају висока прецизност, поузданост и продуктивност. Захваљујући могућности аутоматизације и интеграције са CNC системима, ласерско сечење данас представља један од најзаступљенијих неконвенционалних поступака обраде материјала [2], [3].

Процес ласерског сечења заснива се на интеракцији високо концентрисаног ласерског зрака са материјалом, при чему долази до локалног загревања, топљења и делимичног испаравања материјала, док помоћни гас омогућава ефикасно уклањање растопљене масе из зоне обраде [4], [5]. Квалитет добијеног реза директно зависи од великог броја процесних параметара, међу којима се издвајају брзина сечења, снага ласера, притисак помоћног гаса, положај фокуса и карактеристике материјала који се обрађује [6], [7]. Неправила избор ових параметара може довести до појаве различитих дефеката, као што су повећана храпавост површине, промена ширине реза, деформације и одступања од пројектоване геометрије. Савремена производња поставља све веће захтеве у погледу геометријске тачности и поновљивости процеса. Поред класичних показатеља квалитета, као што су храпавост површине, ширина реза и термички утицај зона, све већи значај добијају локалне геометријске карактеристике сложених контура. Посебно је значајан радијус контуре реза, који представља један од показатеља способности процеса да верно репродукује пројектовану геометрију обратка. Одступања у вредности радијуса могу негативно утицати на функционалност и квалитет готовог производа, нарочито код компоненти сложене геометрије које се користе у индустријама са високим захтевима у погледу прецизности.

Иако је област ласерског сечења интензивно истраживана, већина доступних радова усмерена је на анализу стандардних показатеља квалитета, као што су

храпавост површине, ширина реза и термички утицана зона. Са друге стране, анализа радијуса контуре реза као специфичне геометријске карактеристике још увек није довољно заступљена у литератури. Управо овај недостатак представља мотивацију за спровођење истраживања приказаног у овом раду.

Због сложености процеса и међусобне зависности великог броја параметара, јавља се потреба за применом савремених статистичких метода моделирања и оптимизације. У том контексту, метода одзивне површине (енг. Response Surface Methodology – RSM) представља један од најчешће коришћених приступа, јер омогућава истовремену анализу утицаја више параметара и развој математичких модела за описивање и предвиђање понашања процеса [6], [8].

Научни допринос овог рада огледа се у систематској анализи утицаја процесних параметара на радијус контуре реза као специфичан показатељ геометријске тачности при ласерском сечењу. За разлику од већине досадашњих истраживања, у којима су доминантно анализирани глобални показатељи квалитета, у овом раду посебна пажња посвећена је локалним геометријским одступањима у зонама промене правца кретања ласерске главе.

Основни циљ истраживања је да се применом методе одзивне површине утврди и квантитативно опише утицај кључних процесних параметара на радијус контуре реза, као и да се развије математички модел за предвиђање посматране излазне величине. Полазна хипотеза рада заснива се на претпоставци да постоји статистички значајна зависност између изабраних улазних параметара процеса и посматране излазне величине, те да је могуће развити поуздан математички модел за предвиђање радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара [6], [8].

2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

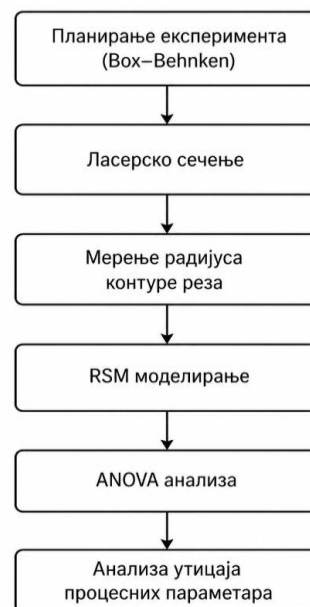
Експериментална истраживања спроведена су на CNC машини за ласерско сечење Glorystar GS4020, опремљеној влакнастим ласером максималне снаге 1,5 kW. Као материјал обрадка коришћен је хладно ваљани нискоугљенични челик EN 10130 дебљине 5 mm. Због добре пластичности, уједначене микроструктуре и широке индустријске примене, овај материјал представља погодан избор за анализу утицаја процесних параметара на геометријску тачност ласерског сечења.

За анализу утицаја процесних параметара на радијус контуре реза примењена је метода одзивне површине (*Response Surface Methodology* – RSM). За планирање експеримената коришћен је Box–Behnken експериментални план са три фактора на три нивоа. Овај приступ омогућава ефикасно испитивање појединачних и интеракционих утицаја параметара уз релативно мали број експеримената.

Као улазни параметри усвојени су брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса, док је као излазни параметар посматран радијус контуре реза. Укупно је реализовано 17 експерименталних огледа применом Box–Behnken експерименталног плана. Нивои варирања посматраних параметара дефинисани су на основу технолошких могућности машине и

результата претходних истраживања и приказани су у Табели 1. Ток спроведеног истраживања приказан је на Слици 1.

Радијус контуре реза представља један од показатеља геометријске тачности процеса, јер описује одступање стварно добијене контуре од пројектоване геометрије. Након извођења експеримената, мерење је извршено применом оптичког микроскопа Euromex NexiusZoom EVO.



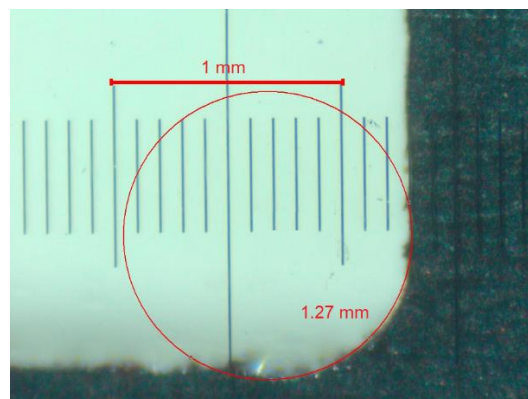
Слика 1. Методолошки ток спроведеног истраживања

Приказани опсежи параметара омогућавају анализу њиховог појединачног и међусобног утицаја на радијус контуре реза, као и развој математичког модела за предвиђање посматраног одзива.

Табела 1. Врсте система за обраду сигнала

Фактор	Јединица	-1	0	1
Брзина сечења	m/min	0.9	1.1	1.3
Снага ласера	%	80	84	88
Притисак гаса	bar	1.0	1.1	1.2

Начин дефинисања и мерења радијуса контуре реза приказан је на Слици 2.



Слика 2. Шематски приказ дефинисања и мерења радијуса контуре реза.

На основу Box–Behnken експерименталног плана реализовано је 17 огледа. Комбинације улазних параметара и добијене вредности радијуса контуре реза приказане су у Табели 2.

Табела 2. Експериментални план и добијене вредности радијуса контуре реза

Редни број	Улазни фактори			Радијус r (mm)
	v [m/min]	P_w [%]	P [bar]	
1.	0.90	80.00	1.10	1.02
2.	1.30	80.00	1.10	0.82
3.	0.90	88.00	1.10	1.18
4.	1.30	88.00	1.10	0.92
5.	0.90	84.00	1.00	0.94
6.	1.30	84.00	1.00	0.76
7.	0.90	84.00	1.20	1.26
8.	1.30	84.00	1.20	1.05
9.	1.10	80.00	1.00	0.92
10.	1.10	88.00	1.00	1.04
11.	1.10	80.00	1.20	1.15
12.	1.10	88.00	1.20	1.27
13.	1.10	84.00	1.10	0.88
14.	1.10	84.00	1.10	0.93
15.	1.10	84.00	1.10	0.9
16.	1.10	84.00	1.10	0.95
17.	1.10	84.00	1.10	0.89

Добијени експериментални резултати коришћени су за развој математичког модела другог реда применом методе одзивне површине. Анализа података спроведена је у софтверском пакету Design-Expert (DX7), при чему су примењене ANOVA анализа, контурни дијаграми и тродимензионалне површине одзива ради анализе утицаја процесних параметара и одређивања моделирање и анализа процеса

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На основу експерименталних резултата развијен је математички модел другог реда применом методе одзивне површине. За анализу података коришћен је софтверски пакет Design-Expert (DX7), а након *Fit Summary* анализе усвојен је квадратни модел као најпогоднији за описивање зависности између процесних параметара и радијуса контуре реза.

Добијени модел показао је високу статистичку значајност ($p < 0,0004$), што указује да постоји јака зависност између улазних параметара и посматране излазне величине. Развијени регресиони модел омогућава предвиђање вредности радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара.

Анализом коефицијената модела уочено је да повећање брзине сечења доводи до смањења радијуса контуре реза, док повећање снаге ласера и притиска

помоћног гаса узрокује његов пораст. Овакво понашање може се објаснити различитим интензитетом уноса топлотне енергије и начином уклањања растопљеног материјала из зоне обраде.

Статистичка значајност развијеног модела испитана је применом анализе варијансе (ANOVA). Резултати показују да је квадратни модел статистички значајан, при чему вредност F-фактора износи 38,74, док је p -вредност мања од 0,0001. То указује на веома малу вероватноћу да су добијени резултати последица случајне грешке.

ANOVA for Quadratic model

Response 1: Radijus

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.3425	9	0.0381	38.74	< 0.0001	significant
A-Brzina sečenja	0.0903	1	0.0903	91.95	< 0.0001	
B-Snaga lasera	0.0313	1	0.0313	31.82	0.0008	
C-Prитисак гаса	0.1431	1	0.1431	145.71	< 0.0001	
AB	0.0009	1	0.0009	0.9164	0.3703	
AC	0.0002	1	0.0002	0.2291	0.6468	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
A ²	0.0003	1	0.0003	0.3282	0.5846	
B ²	0.0295	1	0.0295	30.07	0.0009	
C ²	0.0432	1	0.0432	43.95	0.0003	
Residual	0.0069	7	0.0010			
Lack of Fit	0.0035	3	0.0012	1.36	0.3741	not significant
Pure Error	0.0034	4	0.0009			
Cor Total	0.3494	16				

Factor coding is **Coded**.

Sum of squares is **Type III - Partial**

The **Model F-value** of 38.74 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, C, B², C² are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

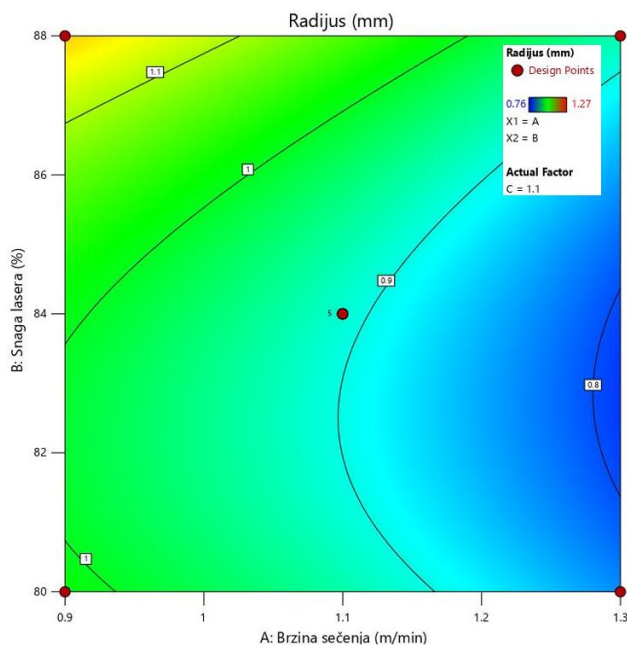
The **Lack of Fit F-value** of 1.36 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 37.41% chance that a Lack of Fit F-value this large could occur due to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.

Слика 3. ANOVA анализа квадратног модела

Анализа појединачних фактора показала је да брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса имају статистички значајан утицај на радијус контуре реза. Највећи утицај остварује притисак помоћног гаса, што потврђује његова највећа вредност F-фактора. Са друге стране, интеракциони чланови нису показали статистички значајан утицај, док квадратични чланови указују на присуство нелинеарних зависности између параметара процеса и посматраног одзива.

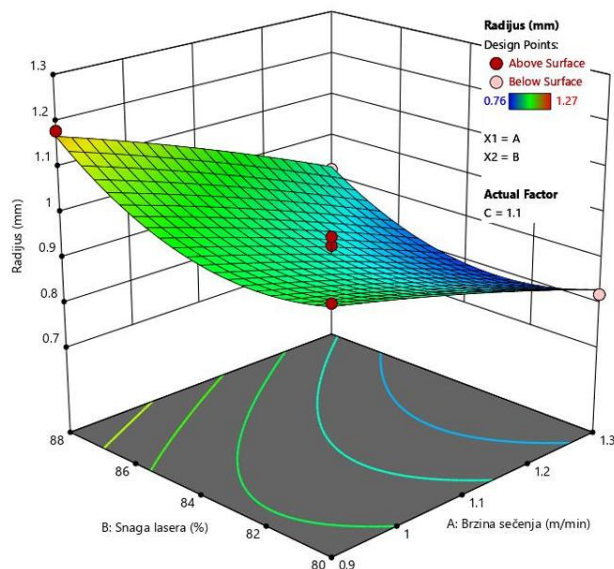
Вредности коефицијената $R^2 = 0,9803$, $Adj R^2 = 0,9550$ и $Predicted R^2 = 0,8256$ указују на добро слагање модела са експерименталним резултатима и задовољавајућу способност предвиђања. Такође, вредност параметра *Lack of Fit* није статистички значајна, што потврђује адекватност развијеног модела. У циљу бољег разумевања утицаја процесних параметара формирани су контурни дијаграми и тродимензионалне површине одзива.

На Слици 4 приказан је контурни дијаграм који илуструје утицај процесних параметара на радијус контуре реза. Уочава се да промене брзине сечења, снаге ласера и притиска помоћног гаса значајно утичу на посматрани одзив, при чему различите комбинације параметара доводе до различитих вредности радијуса контуре реза.



Слика 4. Контурни дијаграм утицаја процесних параметара на радијус контуре реза

На Слици 5 приказана је тродимензионална површина одзива која представља зависност радијуса контуре реза од процесних параметара. Приказана површина омогућава детаљније сагледавање нелинеарних зависности и промена посматраног одзива унутар испитиваног опсега параметара. Добијени резултати потврђују да развијени математички модел адекватно описује понашање процеса ласерског сечења.



Слика 5. Тродимензионални приказ зависности радијуса контуре реза од процесних параметара

Добијени резултати су у сагласности са доступним истраживањима из литературе [2,4], у којима је показано да процесни параметри имају значајан утицај на геометријску тачност ласерски изведених контура. Посебно се издваја значај контроле топлотног уноса, јер он директно утиче на стабилност процеса и квалитет добијеног реза.

Ова истраживања показују да метода одзивне површине представља поуздан алат за моделирање процеса ласерског сечења, јер омогућава ефикасну анализу утицаја процесних параметара и развој математичких модела уз релативно мали број експерименталних испитивања.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду анализиран је утицај процесних параметара ласерског сечења на радијус контуре реза применом методе одзивне површине. Истраживање је спроведено на материјалу EN 10130, при чему су као улазни параметри разматрани брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса.

На основу спроведених експерименталних истраживања и статистичке анализе развијен је математички модел другог реда који омогућава предвиђање вредности радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара. Добијени модел показао је високу статистичку значајност и добро слагање са експерименталним резултатима.

Резултати су показали да сва три процесна параметра имају значајан утицај на радијус контуре реза, при чему је највећи утицај остварио притисак помоћног гаса. Уочено је да повећање брзине сечења доводи до смањења радијуса контуре реза, док повећање снаге ласера и притиска помоћног гаса узрокује његов пораст.

Применом методе одзивне површине успешно је развијен математички модел који омогућава анализу и предвиђање радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега процесних параметара. Добијени резултати потврђују да RSM представља ефикасан алат за анализу и моделирање процеса ласерског сечења.

Практични значај истраживања огледа се у могућности примене развијеног модела при избору оптималних параметара обраде, чиме се може унапредити геометријска тачност производа, смањити потреба за накнадном обрадом и повећати ефикасност производног процеса.

У будућим истраживањима могуће је проширити анализу укључивањем додатних процесних параметара, различитих врста материјала и савремених метода машинског учења ради даљег унапређења предикције и оптимизације процеса ласерског сечења.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] W. M. Steen and J. Mazumder, "Laser Material Processing", 4th ed., London, Springer, 2010.
- [2] М. Мадић, "Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције", Докторска

дисертација, Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, 2013.

- [3] G. E. P. Box and D. W. Behnken, "Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables", *Technometrics*, Vol. 2, No. 4, pp. 455-475, 1960.
- [4] M. Madić and M. Radovanović, "Application of RCGA-ANN Approach for Modeling Kerf Width and Surface Roughness in CO₂ Laser Cutting of Mild Steel", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25, No. 6, pp. 1189-1200, 2014.
- [5] J. Powell, "CO₂ Laser Cutting", Berlin, Springer, 1993.
- [6] J. C. Ion, "Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application", Oxford, Butterworth-Heinemann, 2005.
- [7] D. Petring, "Laser Cutting", in *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Orlando, Laser Institute of America, 2001, pp. 135-158.
- [8] A. K. Dubey and V. Yadava, "Laser Beam Machining – A Review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 609-628, 2008.
- [9] S. H. Dahotre and N. B. Harimkar, "Laser Fabrication and Machining of Materials", New York, Springer, 2008.
- [10] D. Schuöcker, "Handbook of the EuroLaser Academy", London, Chapman & Hall, 1998.
- [11] M. Madić, M. Radovanović and M. Trajanović, "Optimization of CO₂ Laser Cutting Process Using Response Surface Methodology", *Journal of Production Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 97-100, 2014.
- [12] L. Tong, C. C. Su and C. T. Wang, "The Optimization of Multi-Response Problems in the Taguchi Method", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 14, No. 4, pp. 367-380, 1997.

Кратка биографија:

Марко Зекић рођен је у Угљевiku 2001. године. Дипломирао је на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Производно машинство, 2024. године. Мастер рад из области Производног машинства – „Анализа радијуса контуре реза применом методе одзивне површине“, одбранио је 2026. године.

Контакт: zekic@uns.ac.rs