

Sanja Petronić
Tatjana Šibalija

OBRADA MATERIJALA LASEROM: OSNOVE, PRIMENA I OPTIMIZACIJA

AKADEMSKA MISAO
Beograd, 2021.

*Sanja Petronić
Tatjana Šibalija*

**OBRADA MATERIJALA LASEROM: OSNOVE, PRIMENA I
OPTIMIZACIJA**

Recenzenti

Prof. dr Anđelka Milosavljević

Prof. dr Aleksandar Sedmak

Prof. dr Zoran Stević

Izdavač

AKADEMSKA MISAO

Štampa

Akadska misao

Tiraž

100 primeraka

ISBN

978-86-7466-884-9

PREDGOVOR

Monografija „Obrada materijala laserom: osnove, primena i optimizacija“ daje prikaz rezultata originalnih naučnih istraživanja, koja su sprovedena kao nastavak istraživanja započetih u kontekstu doktorskih disertacija autorki realizovanih na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Ideja za nastanak ove monografije proizašla je kao rezultat velikog broja zajedničkih radova autorki u smislu uspešne sinergije dva istraživačka pravca – procesi obrade superlegura laserom i napredna metodologija za parametarsku višekriterijumsku optimizaciju procesa, čime je dat značajan doprinos u oblasti laserske obrade superlegura u zemlji i svetu. Posle uvodnih napomena o laserima, istoriji i principima, autorke detaljnije razmatraju osnovne principe, istoriju i primenu laserskog bušenja, laserskog sečenja i mehaničke obrade materijala laserom. Monografija obuhvata i parametarsku optimizaciju procesa laserske obrade primenom napredne metodologije bazirane na tehnikama veštačke inteligencije, koju je neophodno izvesti usled kompleksnosti zahteva za više izlaznih karakteristika procesa, specifičnosti primene superlegura u nepovoljnim radnim uslovima, na visokim pritiscima i temperaturama, kao i strogih zahteva u smislu preciznosti obrade.

Autorke se, pre svih, zahvaljuju recenzentima - prof. dr Anđelki Milosavljević, prof. dr Aleksandru Sedmaku i prof. dr Zoranu Steviću na konstruktivnim sugestijama tokom pripreme monografije, kao i eminentnim stručnjacima iz predmetne naučne oblasti, iz zemlje i inostranstva, koji su razumeli značaj laserske obrade materijala i njihove optimizacije i podržali sprovođenje istraživanja prikazanih u monografiji. Autorke se posebno zahvaljuju dr Dubravki Milovanović i dr Katarini Čolić na pomoći tokom istraživanja. Autorke se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na podršci delu istraživanja i rezultata prikazanih u monografiji.

Beograd,
maj 2021.godine

dr Sanja Petronić
prof. dr Tatjana Šibalića

Sadržaj

1	UVOD.....	1
	Literatura.....	6
2	LASERI: OSNOVE, ISTORIJSKI PREGLED I PRIMENA.....	8
2.1	Kratka istorija lasera.....	8
2.2	Jednostavnost i jedinstvena svojstva lasera	11
2.3	Parametri lasera, laserski spektar i talasi.....	12
2.4	Podela laserskih sistema	13
2.4.1	Laserski sistemi koji uključuju aktivne laserske medijume male gustine	13
2.4.2	Laserski sistemi sa aktivnim medijumima visoke gustine.....	15
2.4.3	CO ₂ laseri i Nd: YAG laseri	18
2.5	Princip obrade laserom	20
2.6	Poređenje lasera	22
	Literatura.....	24
3	METODOLOGIJE ZA PARAMETARSKU OPTIMIZACIJU PROCESA: PREGLED LITERATURE.....	25
	Literatura.....	33
4	PREDLOG METODOLOGIJE ZA PARAMETARSKU OPTIMIZACIJU PROCESA LASERSKE OBRADE SA VIŠE IZLAZNIH KARAKTERISTIKA	38
4.1	Faza I: Statistička obrada eksperimentalnih podataka	38
4.2	Faza II: Modelovanje procesa	42
4.3	Faza III: Optimizacija parametara procesa.....	45
4.3.1	Genetski algoritam (GA).....	46
4.3.2	Algoritam simuliranog odgrevanja (SA)	47
4.3.3	Algoritam optimizacije rojem čestica (PSO).....	49
4.3.4	Algoritam optimizacije na bazi procesa podučavanja i učenja (TLBO)	51
	Literatura.....	54
5	BUŠENJE MATERIJALA PRIMENOM LASERA.....	57
5.1	Istorijski razvoj procesa laserskog bušenja	57

5.2	Pregled literature	58
5.3	Principi i mehanizmi procesa bušenja laserskim snopom	59
5.3.1	Princip procesa laserske obrade materijala bušenjem	61
5.3.2	Parametri koji utiču na kvalitet rupe	63
5.3.3	Prednosti i ograničenja procesa bušenja laserskim snopom	72
5.4	Rezultati eksperimentalne analize	73
5.4.1	Grafički prikaz i diskusija dobijenih rezultata	75
5.4.2	Mikrotvdoća	80
5.4.3	SEM i EDS analiza rupa bušenih laserom	83
5.5	Modelovanje i optimizacija parametara procesa laserskog bušenja	84
5.5.1	Faza I: Statistička obrada eksperimentalnih podataka	84
5.5.2	Faza II: Modelovanje procesa	89
5.5.3	Faza III: Optimizacija parametara procesa	93
5.6	Primena optimalnih parametara procesa laserskog bušenja	102
	Literatura	106
6	SEČENJE MATERIJALA PRIMENOM LASERA	110
6.1	Pregled literature	110
6.2	Istorijski razvoj	111
6.3	Principi i mehanizmi procesa sečenja laserskim snopom	113
6.3.1	Karakteristike kvaliteta reza	113
6.3.2	Karakteristike procesa	113
6.3.3	Vrste laserskog sečenja	114
6.3.4	Izlazi iz procesa laserske obrade sečenjem	114
6.3.5	Parametri procesa sečenja laserom	116
6.4	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja	122
6.4.1	Sečenje Nimonik 263 legure Nd:YAG laserom	122
6.4.2	Sečenje čelika CO ₂ laserom	129
6.4.3	Sečenje Nimonik 263 legure CO ₂ laserom	132
6.5	Modelovanje i optimizacija parametara procesa laserskog sečenja	134
6.5.1	Faza I: Statistička obrada eksperimentalnih podataka	134

6.5.2	Faza II: Modelovanje procesa	139
6.5.3	Faza III: Optimizacija parametara procesa.....	142
6.6	Primena optimalnih parametara procesa laserskog sečenja	151
	Literatura.....	153
7	MEHANIČKA I TERMOMEHANIČKA OBRADA LASEROM	157
7.1	Kratka istorija LSP obrade materijala	157
7.2	Pregled literature	159
7.3	Principi mehaničke i termomehaničke obrade laserom	161
7.3.1	Parametri laserskog procesa LSP	162
7.3.2	Apsorpcioni premaz i transparentni sloj.....	168
7.3.3	Modifikacija morfologije površine i mikrostrukture	173
7.4	Rezultati eksperimentalne analize	173
7.4.1	Obrada Nimonic 263 legure pikosekundnim laserom	173
7.4.2	Obrada Ti6Al4V legure pikosekundnim laserom	181
7.4.3	Obrada Nimonic 263 legure milisekundnim laserom	186
7.5	Modelovanje i optimizacija parametara procesa laserske površinske mehaničke obrade materijala	187
7.5.1	Faza I: Statistička obrada eksperimentalnih podataka	187
7.5.2	Faza II: Modelovanje procesa	192
7.5.3	Faza III: Optimizacija parametara procesa.....	194
7.6	Primena optimalnih parametara procesa mehaničke obrade laserom .	204
	Literatura.....	208
8	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I BUDUĆA ISTRAŽIVANJA.....	215

1 UVOD

Upotreba lasera u obradi materijala široko je rasprostranjena poslednjih decenija i pokriva čitav niz obrađenih materijala, mehanizme termičke i atermičke obrade, kao i obrade materijala sa razaranjem i bez razaranja. Laseri za obradu materijala klasifikovani su prema aktivnom medijumu: gasu, tečnom ili čvrstom, prema izlaznoj snazi: mW, W ili kW, prema talasnoj dužini (infracrvena, vidljiva i ultraljubičasta), režimu rada (kontinualni, impulsni ili kombinovano), i prema primeni (mikroobrada, makroobrada). U današnje vreme najčešće primene laserske obrade materijala su lasersko zavarivanje, lasersko sečenje, lasersko bušenje, kao i laserska mehanička obrada materijala i lasersko čišćenje.

U ovoj knjizi će biti opisani mehanizmi, primena i optimizacija parametara procesa bušenja laserom, sečenja laserom i mehaničke obrade laserom. Procesi koji nastaju laserskim zavarivanjem, njihova primena i optimizacija prevazilaze obim ove knjige pa će biti opisani u narednim studijama, odnosno, ne spadaju u domen ove knjige.

Impulsni Nd: YAG laserski sistemi, prosečne snage do 500 W su najpogodniji za process laserskog bušenja pošto su sposobni da proizvedu kvalitetnu rupu, sa visokim odnosom dubine i prečnika (Bandyopadhyay et al., 2005). Lasersko bušenje se koristi za bušenje rupa u aeroprofilima turbinskih motora, mlaznicama, satovima itd. Proces uključuje primenu laserskog snopa za zagrevanje materijala do njegove tačke topljenja ili temperature isparavanja. Rastopljeni materijal ili para se izbacuju pomoćnim gasom. Kada se para ili rastopljeni materijal izbaci u okolnu atmosferu, deo se može kondenzovati na površini radnog predmeta kao neželjeni sloj (rasprskavajući sloj). Bušenje laserom omogućava proizvodnju rupa vrlo malog prečnika (reda mikrona), što daje visok odnos dubine i prečnika.

Velika gustina snopa i vrlo kratki impulsi (ns, ps opseg) smanjuju zonu uticaja toplote u području interakcije lasera i materijala (Pandey et al., 2006, Bandyopadhyay et al., 2005, Petronic et al., 2019). Uprkos činjenici da nove vrste lasera - Ti: safir sa femtosekundnim impulsima - imaju manju zonu uticaja toplote i proizvode rupe boljih karakteristika (Zhu et al., 1999), Nd: YAG laseri i dalje vode u industriji bušenja zbog njihove visoke prosečne snage i njihove pogodnosti (kompaktnost, cena, brojni dobavljači itd. Strože tolerancije i visoki zahtevi za kvalitetom rupa aero-mašine i kopnene gasne turbine zahtevaju stepen suženja blizu nule, visok odnos dubine i prečnika i kružnost blizu 1 (Petronic et al., 2010, Sibalića et al., 2011). Postizanje optimalnog kvaliteta rupa je važno područje istraživanja. Prethodne studije (Pandey et al., 2006, Petronic 2010) posvećene impulsnom Nd: YAG laserskom bušenju, postizale su potreban kvalitet rupe optimalnim karakteristikama laserskog snopa (energija impulsa, frekvencija impulsa, trajanje impulsa), položajem fokusa sočiva, položajem i tipom mlaznica i pritiskom pomoćnog gasa. Efikasan laser za bušenje

visokokvalitetne rupe za kritične primene zavisi od pravilnog izbora i optimizacije ovih parametara.

U postojećoj literaturi, analitički modeli koji prikazuju zavisnost kontrolnih parametara i izlaznih karakteristika iz procesa laserskog bušenja nisu egzaktno definisani u smislu obuhvata većeg broja raznorodnih izlaznih karakteristika, što se odnosi i na parametarsku optimizaciju procesa (Sibalija i saradnici, 2011). Kako bi se ocenio uticaj parametara procesa laserskog bušenja na skup izlaznih karakteristika pri obradi ploča izrađenih od materijala Nimonic 263, realizovan je eksperiment sa 15 izvođenja. Frekvencija impulsa [Hz] i trajanje impulsa [ms] su usvojeni kao kontrolni parametric procesa, čije vrednosti su varirane na dva nivoa u eksperimentu. Na izlazu su posmatrane vrednosti sedam karakteristika: ulazni prečnik otvora (rupe), izlazni prečnik otvora (rupe), stepen suženja, odnos dubina - prečnik, cirkularnost ulaznih rupa, cirkularnost izlaznih rupa i površina rasprskivanja. Podaci dobijeni iz eksperimenta su podvrgnuti statističkoj obradi a zatim korišteni za razvoj modela procesa koristeći veštačke neuronske mreže. Usvojeni neuronski model procesa je predstavljao funkciju cilja za metaheurističke algoritme, koji su primenjeni sa ciljem identifikacije optimalnih vrednosti parametara procesa laserskog bušenja kojim se postižu željene (ciljane) vrednosti za izlazne karakteristike. Identifikovani globalni optimum, tj. skup optimalnih vrednosti kontrolnih parametara bušenja laserom, je uspešno verifikovan u praksi, dajući vrednosti izlaznih karakteristika vrlo bliske specificiranim željenim vrednostima. Postupak, kao i rezultati modelovanja procesa laserskog bušenja su detaljno prikazani u ovoj knjizi, kao i rezultati verifikacionog eksperimenta.

Lasersko sečenje je beskontaktni proces zasnovan na toplotnoj energiji. Termička energija, potrebna za proces, dobija se od intenzivne laserske svetlosti koja je sposobna da rastopi gotovo sve materijale poznate čoveku (Dubey and Yadava, 2008). Apsorbovana toplotna energija prvo zagreva obradak, a zatim zapreminu dovodi u skoro rastopljeno stanje koje se lako može ukloniti pomoćnim mlazom gasa koji je koaksijalan sa laserskim snopom (Dubey and Yadava, 2008). Danas se u obradi metala najčešće koriste dve vrste laserskog zračenja infracrvenog spektralnog zračenja: CO₂ i Nd: YAG laser. CO₂ laseri (talasna dužina 10,6 mm) su najpopularniji su za sečenje profila u limu, zbog boljeg kvalitetom snopa, veće dubine fokusa i manjeg prečnikom snopa od Nd: YAG lasera (Fomin et al., 2012). Nd: YAG laseri imaju malu snagu snopa, ali kada rade u impulsnom režimu čime se postiže velika vršna snaga kojom je moguće sečenje i debljih materijala (Sharifi i Akbari, 2011). Lasersko sečenje se primenjuje u raznim proizvodnim industrijama gde veliki broj raznovrsnih komponenti mora biti obrađeno visokim kvalitetom i niskom tolerancijom uz male troškove. Brojne dodatne prednosti kao što su: pogodnost rada, visoka preciznost, mala zona pod uticajem toplote, minimum deformacija, mali otpad, nizak nivo buke, fleksibilnost, jednostavnost automatizacije (I.A. Almeida et al., 2006; Singh et al., 2010; Sibalija et al., 2019) zajedno sa tehnološkim poboljšanjima u laserskim mašinama, učinili su tehnologiju laserskog sečenja veoma