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, *dr Sanja Petronić*

maj 2021.godine *prof. dr Tatjana Šibalija*

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 Nimonik 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 (kontiunalni, 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 (Bandyopadhayay 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, Bandyopadhayay 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, Sibalija 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 Nimonik 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 karaktereristika: 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 predstavaljo funkciju cilja za metaheurističke algorime, 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 process, 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: CO_2 i Nd: YAG laser. CO_2 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