

Sanja Petronić<sup>1</sup>, Dubravka Milovanović<sup>1</sup>, Andjelka Milosavljević<sup>2</sup>, Željko Radovanović<sup>3</sup>, Olivera Erić-Cekić<sup>4\*</sup>, Radomir Jovičić<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija, <sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, <sup>3</sup>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, Beograd, Srbija, <sup>4</sup>Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd, Srbija

Pregledni rad  
ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585  
UDC:620.197.5:669.018.1  
doi:10.5937/zasmat1901026P



Zastita Materijala 60 (1)  
26 – 43 (2019)

## Laserske obrade superlegure Nimonic 263

### IZVOD

U ovom radu, proučavan je uticaj parametara određenih procesa laserske tehnike obrade materijala superlegure Nimonic 263 - bušenje, rezanje, zavarivanje i mehanička obrada laserom. Bušenje i zavarivanje su vršeni na laseru Nd:YAG laserom model HTS Mobile LS-P160. Prilikom bušenja rupa varirani su parametri frekvencije impulsa (5 Hz, 7Hz i 9 Hz) i dužine trajanja impulsa (1,8 ms do 3,6 ms). Ispitivana je mikrostruktura i određene su geometrijske i metalurške karakteristike rupa dobijenih ovim parametrima, na osnovu čega je izvršena optimizacija parametara obrade. Rezanje je izvedeno na laseru tipa Bistronic laser, (2000), BISTAR 3015. Varirani su parametri srednje snage lasera, brzina lasera, pritisak gasa i položaj fokusa. Na osnovu dobijenih geometrijskih karakteristika rezova i površinske morfologije diskutovani su i određeni optimalni parametri. Laserom zavareni spojevi limova legure Nimonic 263 su, osim mikroskopskih i profilometrijskih ispitivanja površina, ispitivani i metodom sa razaranjem. Prilikom laserskog deformacionog ojačavanja uzorci su bili izloženi laserskom svetlu na talasnoj dužini od 1064 nm i 532 nm, sa brojem akumuliranih impulsa: 50, 100 i 200. U svim delovima eksperimenta strukturalna analiza superlegure Nimonic 263 izvedena je pomoću svetlosne mikroskopije (SM), skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) i EDS-analize. Merenja mikrotvrdoće vršena su pomoću metode Vikersa pod opterećenjem od 9,81N. Profilometrija je izvedena na beskontaktnom profilometru Zygo NewView 7100.

**Ključne reči:** laserska obrada, Nimonic 263, EDS, mikotvrdoća, profilometrija.

### 1. UVOD

Superlegure nikla su materijali sa izuzetnim kombinacijom mehaničkih i fizičkih karakteristika, koje doprinose njihovoj širokoj primeni, kao što su izrade delova gasnih turbina, aero i raketnih motora, delova za hemijsku preradu [1]. Nimonic legure pripadaju grupi superlegura nikla koje se koriste kod izrade delova od kojih se zahtevaju visoke mogućnosti pri radu na visokim temperaturama od 0°C do 1050° C i u agresivnim sredinama [2]. Nimonic 263 legura je važna niklova legura koja otvrdnjava taloženjem sa visokom otpornošću na puzanje i otpornost na oksidaciju, projektovana za stacionarne komponente kao što su komore za sagorevanje, kućišta, izduvne kanale, kućište ležaja i ostalo [3].

Izdvajaju se dve karakteristične grupe postupaka obrade laserom: obrade skidanjem materijala i toplotno termičke obrade materijala. U prvu grupu spadaju sledeće operacije: sečenje i prosecanje, bušenje i perforiranje, izrada prostornih i složenih površina, graviranje i markiranje. U drugu grupu spadaju: zavarivanje i lemljenje, termička obrada, oplemenjivanje i ojačavanje materijala, savijanje lima itd.

Pri obradi laserom, zbog ekstremno visoke temperature u zoni obrade, neizbežni su defekti u površinskom sloju materijala obratka (mikrostrukturalne promene, zaostali naponi, mikropukotine i sl.).

Bušenje laserom se koristi da bi se proizveli mali, precizno pozicionirani otvori, sa malim oštećenjima u regionu koji ih okružuje, i na veoma različitim materijalima, kao što su keramika i superlegure [4]. Bušenje laserom je povećano u upotrebi u proizvodnji malih komponentata za elektroniku, avioindustriju i biomedicinu i zato što je to brz, precizan, čist, fleksibilan i efikasan proces. Bušenje laserom se koristi za proizvodnju otvora na mlaznicama i kontrolisano isticanje, pravljenje mik-

\*Autor za korespondenciju: Olivera Erić- Cekić

Email: olivera66eric@gmail.com

Rad primljen: 15. 05. 2018.

Rad korigovan: 10. 09. 2018.

Rad prihvaćen: 15. 09. 2018.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

rokanala u optičkim aplikacijama, kao i u avioindustriji za bušenje submilimetarskih otvora [5]. Takođe, koristi se u tehnologijama odgovornih konstrukcija kao što je bušenje otvora u avio mašinama i električnim komponentama [6].

Obrada se izvodi sa Nd:YAG laserom u impulsnom režimu rada. Obrada raznih materijala i malih otvora prečnika  $\varnothing$  (0,01÷0,5)mm, koji se mogu bušiti ili perforirati, predstavljaju glavne odlike i prednosti lasera u odnosu na druge postupke obrade.

Lasersko zavarivanje je proces velike gustine energije, sa niskim stepenom uvođenja toplote i sa specifičnim prednostima nad konvencionalnim procesima spajanja zavarivanjem. Ovo uključuje velike brzine zavarivanja i usku zonu uticaja toplote, nisku distorziju, lakoću automatizacije, sposobnost zavarivanja debljih sekcija u jednom prolazu i povećanu fleksibilnost dizajna. Kada se govori o zavarivanju metalnih materijala Nd<sup>3+</sup>:YAG laser ima niz prednosti, kao što je visok stepen apsorpcije energije zbog niske refleksije i visoka brzina zavarivanja i mali zaostali naponi u odnosu na CO<sub>2</sub> laser, tako da se primena Nd<sup>3+</sup>:YAG lasera za zavarivanje metalnih materijala stalno povećava, pa je široko implementiran u industrijskim aplikacijama. Lasersko zavarivanje je proces koji topi i spaja metale toplotom nastalom laserskim snopom. Zavarivanje laserskim snopom, kao i kod zavarivanja elektronskim snopom, može da proizvede duboki i uski zavar pri velikim brzinama zavarivanja, sa uskim zonama uticaja toplote i maloj promeni oblika radnog predmeta. Može da se koristi za zavarivanje raznorodnih metala ili njihovih delova, koji se u velikoj meri razlikuju u masi i dimenzijama. Za razliku od zavarivanja elektronskim snopom, kod zavarivanja laserskim snopom vakuum i rendgen zaštita nisu neophodni. Međutim, veoma visoka reflektivnost laserskog snopa sa površine metala je veliki nedostatak. Cena opreme je vrlo visoka, i potrebno je precizno nameštanje i poravnavanje delova koji se zavaruju. Zahvaljujući uskoj zoni zagrevanja, lasersko zavarivanje je posebno značajno kod spajanja tankih limova ili sitnih delova (auto karoserije, limena kućišta, rezervoari, cisterne, paketi limova).

Lasersko sečenje se koristi u industriji od 1970-ih godina. Laserski snop može brže i kvalitetnije da seče limove od konvencionalnih procesa koji se koriste za sečenje limova. Sečenje laserskim snopom je beskontaktni termalni proces u kome je laserski zrak usmeren na radni materijal i apsorbovan je na frontu sečenja.

Obrade materijala koje su zasnovane na energiji snopa su od velike koristi kod materijala koji se teško obrađuju konvencionalnim metodama sa strogim zahtevima za projektovanje, kao što su superlegure. U poređenju sa tradicionalnim procesima,

lasersko sečenje nudi mnoge prednosti kao što su: nema mehaničkog kontakta, nema habanja alata, mogućnost obrade složenih oblika, preciznosti rezanja, oštre ivica reza, uskih "rezova" na gotovo svim kategorijama materijala, uska zona uticaja toplote.

Ovaj proces se zasniva na usmeravanju fokusa snopa lasera na površinu mete, na obezbeđivanju mlaza gasa, obično koaksijalnog sa laserskim snopom, na brzini i energiji laserskog snopa.

U poslednjih nekoliko decenija, površinske modifikacije različitih metala i njihovih legura različitim vrstama lasera stekle su značajnu pažnju. Tretman površina superlegura nikla laserskim zračenjem može izazvati specifične promene u mikrostrukтури praćenih poboljšanim mehaničkim osobinama materijala, [7].

Korisni efekti laserskog deformacionog ojačavanja uključuju poboljšanje mikrostrukture, kvaliteta površine, koji odlaže stvaranje prslina usled zamora. Površinska morfologija metala ima veliki uticaj na karakteristike usled zamora, a mnogi materijali podvrgnuti tretmanu laserske obrade pokazuju poboljšanje u veku trajanja usled zamora, kao što pokazuju Ding i Ye [8]. Stanje površine materijala ima značajan uticaj na zamor, a sledeći faktori imaju najznačajniji efekat: hrapavost, zaostali naponi u površinskom sloju, otvrdnjavanje ili omekšavanje u površinskom sloju, i promene ili transformacije mikrostrukture zbog plastičnih deformacija, predstavljene od Schijve [9].

U ovom radu, dat je pregled laserskih tehnika obrade materijala – superlegure Nimonik 263, prikazane su prednosti laserskih tehnika, njihov uticaj na promenu mikrostrukture i na poboljšanje mehaničkih osobina.

## 2. LITERATURNI PREGLED

Poslednjih godina je povećan interes za laserskim bušenjem korišćenjem impulsnog Nd:YAG lasera. Yeo i saradnici [10], Yilbas i saradnici [11], Chrissolouris i saradnici [12] i Hamoudi i saradnici [13] su optimizovali parametre laserskog procesa kao što su: srednja snaga, impulsna energija, trajanje impulsa, frekvencija impulsa i pozicija fokusa. Optimizacijom parametara oni su smanjili defekte koji se javljaju tokom bušenja laserom. Petronić i saradnici [14] su analizirali uticaj parametara lasera na geometrijske karakteristike rupa bušenih u limovima superlegure nikla debljine 0.7 i 1.2 mm. Panday i saradnici [15] su predložili kriterijum bušenja koji se zasniva na ponašanju plazme stvorene laserom tokom procesa bušenja. Salonitis i saradnici [16] su predstavili teoretski model zasnovan na pretpostavci da tokom svakog laserskog pulsiranja, konačna zapremina materijala bude uklonjena.

U novije vreme se posebna pažnja poklanja parametrima optimizacije Nd: YAG procesa laserske obrade za razne primene

Chen i saradnici [17] su primenili Taguchi metodu u cilju optimizacije parametara. Bandiopadhiai i saradnici [18] su otišli korak dalje i predložili statički pristup baziran na Taguchi metodi da utvrde uticaj parametara procesa u laserskom bušenju. Prema rezultatima pojedinih autora dostizanje višestrukih karakteristika kvaliteta u isto vreme je u funkciji različitih nivoa podešavanja parametara procesa. Quar i saradnici [19] su izvršili modeliranje impulsne Nd: YAG laserske obrade koristeći metodologiju odgovora površine (RSM). Sibalija i saradnici [20] su optimizovali parametre bušenja laserom koristeći Tagučijevu funkciju gubitka kvaliteta.

Detaljan pregled osnovnih principa laserskog procesa rezanja vezanih za mehanizme i performace je prikazan u referencama Chrissolouris i saradnici [21], Steen i saradnici [22].

U široj literaturi se mogu naći podaci o tome da se lasersko rezanje može da koristi za obradu svih vrsta metalnih i nemetalnih materijala koji poseduju minimalno svojstvo apsorpcije infracrvenog zračenja [23].

Shafer i saradnici[24] su u svom radu proučavali lasersko rezanje ugljeničnih čelika, Rajaram i saradnici[25], Cekic i saradnici[26] i Librera i saradnici [27] su proučavali rezanje čelika, Braun i saradnici[28] i Thvari i saradnici[29] rezanje superlegura na bazi nikla, Kintero i saradnici[30] aluminijuma, Pou i saradnici[31] i Lim i saradnici [32] fiberom ojačanih panela, Ghosh i saradnici[33] legura od cirkonijuma, Bicleanu i saradnici[34] su predstavili analitički model za impulsno lasersko rezanje metala, dok su Kim i saradnici[35] predstavili matematički model procesa laserskog rezanja nerđajućeg čelika.

Optimizacija parametara laserskog rezanja se pokazala kao veoma važna kako bi se obezbedio najbolji kvalitet reza.

Kvalitet reza zavisi od parametara laserske obrade kao što su frekvencija impulsa, impulsna energija, širina impulsa, brzina rezanja, tip pomoćnog gasa i njegov pritisak. Dubay i saradnici [36] su pokazali da optimizacija i adekvatna kontrola ovih parametara daju željeni kvalitet rezanja. Petronić i saradnici [37] su optimizovali parametre rezanja austenitnih materijala – nerđajućih čelika. Shanjin i Jang [38] su istraživali i naveli optimalni raspon parametara kao što su: frekvencija impulsa, brzina rezanja, vrsta i pritisak pomoćnog gasa za minimalni ZUT tokom Nd: YAG laserskog rezanja titanijum legure. Almeida i saradnici [39] istraživali

su efekte laserske obrade na kvalitet i formiranje faza na površini reza. Singh i dr. [40] ispitali su uticaj parametara procesa kao što su snaga lasera, brzina rezanja, pritisak gasa na zonu uticaja toplote za materijal polimetil metakrilata (PMMA) pri laserskom rezanju. Kintero i saradnici [41] su predstavili detaljnu studiju o karakteristikama zone uticaja toplote u funkciji prosečne snage lasera, brzine rezanja, pritiska pomoćnog gasa i frekvencije impulsa. Chmelickova i Polak [42] su analizirali uticaj energije impulsa i brzine rezanja na kvalitet reza tokom laserskog rezanja, dok su Mathev i saradnici [43] su proučavali efekat impulsne frekvencije, brzine rezanja, trajanja impulsa i energije impulsa i njenog uticaja na ZUT, širinu reza i koničnost laserske rezne ivice tokom impulsnog Nd: YAG laserskog rezanja.

Značajan analitički i eksperimentalni rad je izvršen na zavarivanju različitih materijala laserom. Annon i saradnici [44] su prikazali zavarivanje četiri različita materijala superlegura nikla debljine do 2 mm CO<sub>2</sub> laserom. Ispitivanje zatezanjem je pokazalo da se dobijaju visoke vrednosti za sva četiri materijala. Guo i saradnici[45] su poredili mikrostrukture i mehaničke osobine dobijene laserom i lučnim zavarivanjem. Bucksons i saradnici [46] su ispitivali uticaj laserskog zavarivanja na rast prsline usled zamora kod superlegura nikla. Shinozaki i saradnici[47] su se bazirali na osetljivosti materijala na tople prsline superlegure nikla tokom laserskog zavarivanja. Qi i saradnici [48] su laserom zavarivali limove superlegure GH4169 debljine od 1mm. Dobijene maksimalne vrednosti zatezne čvrstoće su u granicama zatezne čvrstoće osnovnog materijala i odgovaraju očekivanjima korisnika. Qi i saradnici [49] su analizirali primenu zavarivanja laserom kod repariranja delova aviona od legura aluminijuma, legura titana i superlegura. Čolić i saradnici[50] su ispitivali lasersko zavarivanje materijala za primene u biomedicini. Odabasi i saradnici[51] su ispitivali vezu između unosa toplote i mikrostrukturnih i mehaničkih osobina kod zavarivanja superlegure Inkonel 718. J. R. Berrettaa i W. de Rossib [52] su istraživali uticaj pozicije laserskog snopa u odnosu na spoj, na karakteristike šava, dobijenog zavarivanjem AISI 304 na AISI 420 nerđajući čelik impulsnim Nd:YAG laserom. T. Markovitsa i J. Takácsa[53] su istraživali ivično zavarivanje laminatnih čelika impulsnim Nd:YAG laserom i zaključili su da povećanje brzine zavarivanja smanjuje geometriju spoja pri istim energijama. E. Taban, E. Deleu, A. Dhooge and E. Kaluc [54] su ispitivali zavarivanje laserom modifikovanog 12% Cr čelika, čvrstoću, zamor, žilavost, mikrostrukturu i korozione osobine. Dobijene su dobre vrednosti čvrstoće, duktilnosti i zamornih karakteristika dok je odnos mikrostruktura-osobine detaljno opisani.

Znatan analitički i eksperimentalni rad je sproveden na laserskom deformacionom ojačavanju različitih materijala. Peire i saradnici [55] su predstavili analitičke modele za ograničenu ablaciju, dubinske plastičnosti i zaostale napone indukovane na površini. Takođe su pokazali su da se postupak proračuna metodom konačnih elemenata uspešno primenjuje na predviđanje zaostalih napona indukovanih procesom laserskog udara.

Lasersko deformaciono ojačavanje metalnih površina i njenu primenu predstavili su Devauk i saradnici [56] teorijski i eksperimentalno. Efekat laserskih indukovanih talasa na metale proučavali su Clauer i saradnici [57]. Oni su objasnili uticaj na svojstva materijala, kao što su tvrdoća, zatezna čvrstoća i vek trajanja na zamor. Jilbas i saradnici [58] su prikazali da je vodeći mehanizam za otvrdnjavanje legura pokretanje dislokacija i da se mehaničkom obradom tvrdoća materijala povećava do 1,7 puta u odnosu na osnovni materijal.

Tabela 1. Hemijski sastav superlegure nikla Nimonik 263

Table 1. Chemical composition of superalloy Nimonic 263

Sadržaj elemenata u težinskim procentima											
Element	C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Ti	Ni
Tež.%	0.06	0.3	0.5	0.5	20	20	0.1	0.5	5.9	2.2	balance

### 3.1. Lasersko bušenje

Rupe u limovima su bušene Nd:YAG laserom u impulsnom režimu rada model HTS Mobile LS-P160 (OR Laser), a specifikacije lasera su date u tabeli 2.

Tabela 2. Specifikacija HTS pokretnog LS-P160 Nd:YAG lasera

Table 2. Specification of HTS mobile LS-P160 Nd:YAG laser

Parametri lasera	Opseg parametara
Maksimalna srednja snaga lasera	160 W
Vršna snaga impulsa	7.5 kW
Maksimalna energija impulsa	80J
Trajanje impulsa	0.2–20 ms
Frekvencija impulsa	1.0–20 Hz
Prečnik fokusa	0.2–2.0 mm

Tabela 3. Parametri procesa bušenja laserom

Table 3. The parameters of the drilling process by laser

Parametar laserske obrade	Vrednost (opseg)
Trajanje impulsa [ms]	1,8; 2,0; 2,4; 3,0; i 3,6
Energija impulsa [J]	65,6
Frekvencija impulsa [Hz]	5; 7 i 9
Srednja snaga [W]	128
Mesto fokusa	na površini

S. Petronić i saradnici su prikazali promene u mikrostrukturi i mehaničkim osobinama na superleguri Nimonik 263 [59,60], A.Milosavljević na superleguri železa N-155 [61] kao i u različitim režimima laserskih obrada [62,63]. W.T. Hsiao i saradnici [64] su proizveli grube teksture površine pomoću impulsnog Nd: YAG lasera i istraživali efekte različitih radnih parametara na karakteristike površine i optičke performanse. Chu i saradnici [65] su proučavali plastičnu deformaciju indukovanu laserskim udarom na niskougleničnom čeliku i pokazali da su mikrostruktura i mehanička svojstva izmenjena do dubine oko 100 mm.

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimenti su rađeni na limovima superlegure Nimonik 263. Uzorci su bili hladno valjani i termički obrađeni u dva koraka: 1) rastvarajuće žarenje na 1150 °C/1 h/WC (kaljenje vodom) i 2) taloženje na 800 °C/8 h/AC (hlađenje na vazduhu). U tabeli 1 je dat hemijski sastav ove legure.

Dimenzije ispitivanih uzoraka su 150x150x2 mm. Parametri procesa laserske obrade bušenjem su date u tabeli 3. Identičnim parametrima su bušena po tri rupe i kao merodavna je uzimana izračunata srednja vrednost.

### 3.2. Lasersko rezanje

Za drugi deo eksperimenta - rezanje materijala je korišćen Bistrionic laser, (2000), BISTAR 3015. Korišćen je isti materijal, hemijskog sastava prikazanog u tabeli 1, a dimenzije limova su 50x150x2 mm. U tabeli 4 prikazane su karakteristike lasera za lasersko rezanje, a u tabeli 5 parametri procesa laserskog rezanja korišćeni u eksperimentu.

Tabela 4. Karakteristike lasera Bistrionic laser, (2000), BISTAR 3015

Table 4. Characteristics of Bistrionic laser (2000), BISTAR 3015

Parametri lasera	Opseg parametara
Maksimalna srednja snaga [W]	2800
Brzina [mm/s]	6000
Frekvencija impulsa [Hz]	2500
Pritisak pomoćnog gasa [bar]	20
Polarizacija	kružna

Tabela 5. Parametri laserske obrade rezanjem

Table 5. The parameters of laser machining

Parametri lasera	Opseg parametara
Srednja snaga [W]	1400; 1800; 2800
Brzina [mm/s]	4000; 4500; 5000
Položaj fokusa	na gornjoj strani uzorka; na donjoj strani uzorka; 0,5 mm ispred materijala
Pritisak azota [bar]	4; 8; 12

### 3.3. Zavarivanje laserom

Treći deo eksperimenta je obuhvatio postupak laserskog zavarivanja. Zavarivani su uzorci hemijskog sastava datog u tabeli 1 i debljine 2mm. Za ovaj deo eksperimenta korišćen je laser čije su specifikacije date u tabeli 2. Parametri laserskog procesa zavarivanja su dati u Tabeli 6.

Tabela 6. Parametri laserskog procesa zavarivanja

Table 6. The parameters of the laser welding process

Parametri lasera	Opseg parametara
Energija [J]	250
Trajanje impulsa [ms]	8
Veličina spota [mm]	1
Frekvencija impulsa [Hz]	4

Ispitivanjem zatezanjem su određene zatezne karakteristike uzoraka, a ispitivanja su vršena na mašini Shimadzu kapaciteta 250 kN.

### 3.4. Lasersko deformaciono ojačavanje materijala

Uzorci superlegure Nimonika 263, pripremljeni su za lasersko deformaciono ojačavanje materijala (četvrti deo eksperimenta), polirani su i očišćeni etanolom pre nanošenja zaštitnog sloja. Hemijski sastav Nimonika 263 je naveden u tabeli 1.

Uzorci su obloženi crnom bojom (zaštitni sloj) i uronjeni u destilovanu vodu, koja je služila kao transparentni sloj. Laserski snop je vođen sistemom ogledala i bio fokusiran ispod površine uzorka, pri upadnom uglu od 90°. Specifikacija Nd: YAG EKSPALA, model SL212P lasera je prikazana u tabeli 7.

Tabela 7. Specifikacija Nd: YAG EKSPALA, model SL212P lasera

Table 7. Specification of Nd: YAG EKSPALA, model SL212P laser

Parametri lasera	Opseg parametara
Talasna dužina [nm]	532; 1064
Maksimalna energija impulsa	80J
Trajanje impulsa [ps]	150
Frekvencija impulsa	10 Hz
Mode	about TEM <sub>00</sub> *

Uzorci su bili izloženi laserskom svetlu na talasnoj dužini od 1064 nm i 532 nm, sa brojem akumuliranih impulsa: 50, 100 i 200. Operativni laser je bio Nd: YAG EKSPALA, model SL212P. Na talasnoj dužini od 1064 nm, impulsne energije variraju od 2 mJ do 15 mJ, a odgovarajuće fluktuacije variraju od 0.1 do 0.3 J cm<sup>-2</sup>. Na laserskoj talasnoj dužini od 532 nm, pulsne energije variraju od 20 do 35 mJ, odgovarajuće fluktuacije variraju od 0,28 do 0,4 J cm<sup>-2</sup>.

Svi materijali, u sva četiri dela eksperimenta, su ispitivani svetlosnim mikroskopom model KEYENCE VHZ100 i skenirajućim mikroskopima (SEM) model JEOL JSM-5800 i JEOL JSM-6460LV, a zatim su korišćenjem programa AutoCAD izmerene potrebne geometrijske karakteristike. Mikrotvrdoće su merene na uređaju model Hauser 249A po Vikersu pod opterećenjem od 9,81N i kontaktnim vremenom od 10sec. Takođe, površinske morfološke promene u ozračanim područjima su analizirane pomoću Zygo NewView 7100 optičkog profilometra, a karakteristični parametri površine izračunati su korišćenjem softvera MetroPro.

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1. Lasersko bušenje

Primena lasera za bušenje rupa podrazumeva preciznu analizu parametara rupa kao što su: ulazni i izlazni prečnik, stepen suženja rupe (taper), mikroprrsline, odnos prečnik – dubina, cirkularnost ulaznog i izlaznog prečnika rupe, rasprskavanje, sloj pretopljavanja.

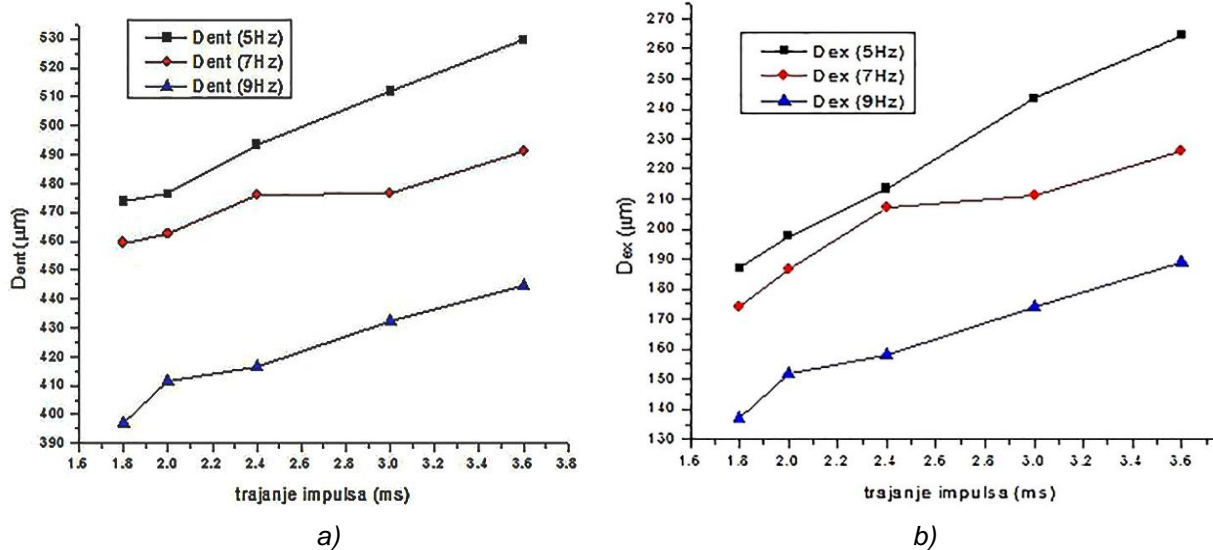
Merenjem i analizom promene prečnika rupa na ulazu i izlazu u zavisnosti od trajanja impulsa za različite frekvencije impulsa došlo se do zaključka da sa smanjenjem frekvencije impulsa povećavaju i ulazni i izlazni prečnik. Povećanjem trajanja impulsa ulazni i izlazni prečnik se povećavaju.

Na slici 1 prikazane su vrednosti ulaznih (sl.1a) i izlaznih (sl. 1b) prečnika rupa u zavisnosti od trajanja impulsa i frekvencije impulsa. Oba dijagrama su za sve frekvencije impulsa pokazala da se najveći skok u veličini prečnika nalazi pri povećanju trajanja impulsa sa 3,0 ms na 3,6 ms.

Stepen suženja, necilindrična priroda rupe, nastaje kao rezultat erozije izazvane isterivanje istopljenog i isparavanog materijala iz rupe. Stepensuženja rupe se određuje prema jednačini (1):

$$\theta = \tan^{-1}(D_{ul}-D_{izl})/t \quad (1)$$

Stepen suženja se smanjuje sa povećanjem debljine materijala [15]. Stepensuženja može da se kontroliše promenom trajanja impulsa, energijom impulsa, brojem impulsa ili različitim dizajnima optičkog sistema.

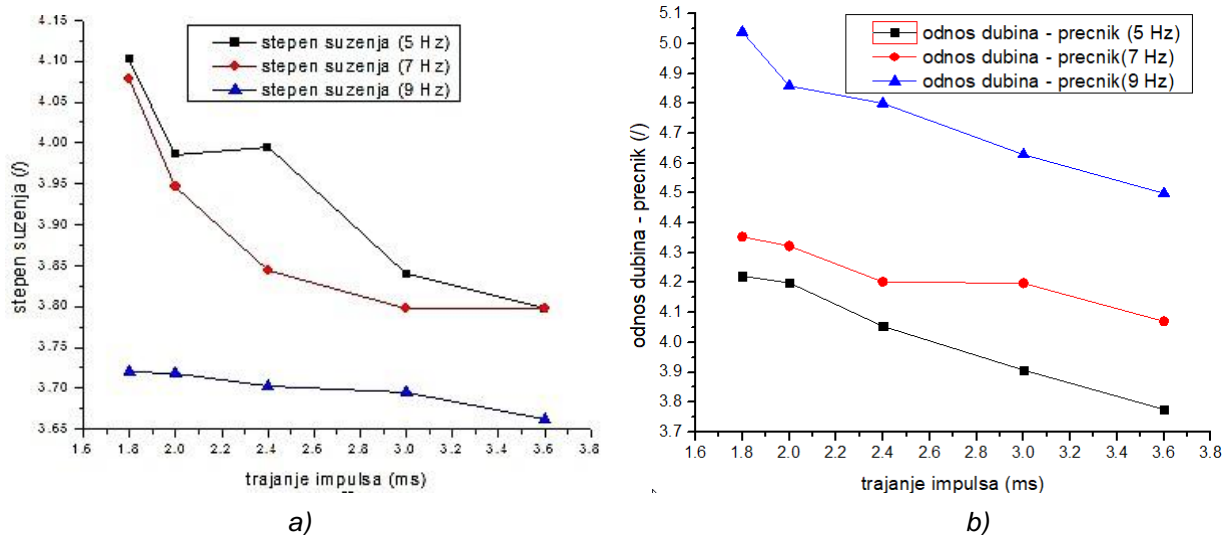


Slika 1. Zavisnost ulaznog (a) i izlaznog (b) prečnika rupa od frekvencije i trajanja impulsa za leguru Nimonic 263 debljine 2 mm

Figure 1. Dependence of (a) the enter side hole circularity and (b) the exit side hole circularity on pulse duration for different pulse frequencies for 2mm thickness Nimonic 263 sheet

Na slici 2a prikazane su vrednosti stepena suženja rupe. Analizom je pokazano da sa porastom frekvencije impulsa stepen suženja se smanjuje, odnosno najmanji stepen suženja je postignut sa frekvencijom impulsa od 9 Hz. Ovo se objašnjava kraćim vremenom između dva impulsa,

odnosno kraćim vremenom hlađenja. Kraća trajanja impulsa daju veće stepene suženja. Vrednosti stepena suženja se povećavaju sa povećanjem dužine trajanja impulsa, dok opadaju sa povećanjem frekvencije.



Slika 2. Stepen suženja (a) i odnos dubina-prečnik (b) za različite frekvencije impulsa i trajanja impulsa

Figure 2. Values of the hole taper (a) and the hole aspect ratio (b) for different pulse frequencies and pulse duration

Na slici 2b prikazane su vrednosti odnosa prečnik-dubina za različite frekvencije impulsa i trajanje impulsa. Geometrijske karakteristike laserom bušenih rupa najbolje se opisuju odnosom

debljina – prečnik. Ograničenje odnosa debljina-prečnik kod nekih materijala zavisi od optičkih karakteristika laserskog snopa i optičkih i termičkih karakteristika materijala [11]. Primećeno je da postoje neka ograničenja kod postizanja zahte-

vanih dubina ukoliko se traži veći prečnik. Najbolje vrednosti odnosa dubina - prečnik su postignute za trajanje impulsa od 1,0 ms, posle čega vrednost opada. Takođe, veće frekvencije su dale veće odnose dubina-prečnik. Cirkularnost rupe predstavlja regularnost odnosno pravilnost kruga koji opisuje rupu. Određuje se iz jednačine (2):

$$C_i = \frac{D_{min}}{D_{max}} \quad (2)$$

Sa "C<sub>en</sub>" je obeležena cirkularnost ulazne rupe, a sa "C<sub>ex</sub>" izlazne. Uticaj i važnost cirkularnosti rupe se odražava tako što je "C<sub>i</sub>" bliže jedinici krug je pravilniji.

Vrednosti cirkularnosti prečnika ulaznih i izlaznih rupa pri promeni vrednosti frekvencija impulsa i trajanja impulse su prikazani u tabeli 8.

*Tabela 8. Vrednosti cirkularnosti prečnika ulaznih i izlaznih rupa pri promeni vrednosti frekvencija impulsa i trajanja impulsa*

*Table 8. Circularity values of the inner and external holes diameter when changing the value of the pulse frequency and pulse duration*

Frekvencija impulsa (Hz)	Trajanje impulsa (ms)	Cirkularnost ulazne rupe C <sub>en</sub>	Cirkularnost izlazne rupe rupe, C <sub>ex</sub>
5	1.8	0.81987	0.7733
5	1.2	0.8256	0.787
5	1.0	0.82991	0.794
5	0.7	0.8852	0.8543
5	0.5	0.90748	0.9214
7	1.8	0.91	0.8082
7	1.2	0.9122	0.8192
7	1.0	0.91322	0.8253
7	0.7	0.9176	0.8832
7	0.5	0.92842	0.9294
9	1.8	0.93949	0.8732
9	1.2	0.94	0.8791
9	1.0	0.94094	0.8836
9	0.7	0.9567	0.912
9	0.5	0.97331	0.9541

Analizom dobijenih vrednosti zaključuje se da kraće trajanje impulsa daju pravilniji krug kod ulaznog i izlaznog kruga rupe. Cirkularnost rupe na ulazu je bliža jedinici za manje frekvencije impulsa, dok je cirkularnost izlazne rupe bolja za veće frekvencije impulsa. Takođe, cirkularnost rupe na ulazu je bliža jedinici nego rupe na izlazu, odnosno krug rupe na ulazu je pravilniji.

Izmerene vrednosti površine rasprskavanja oko rupa u zavisnosti od frekvencije i trajanja impulse su prikazane u tabeli 9.

*Tabela 9. Izmerene vrednosti površine rasprskavanja oko rupa u zavisnosti od frekvencije i trajanja impulsa*

*Table 9. The measured values of surface splashing around the hole depending on the frequency and duration of pulses*

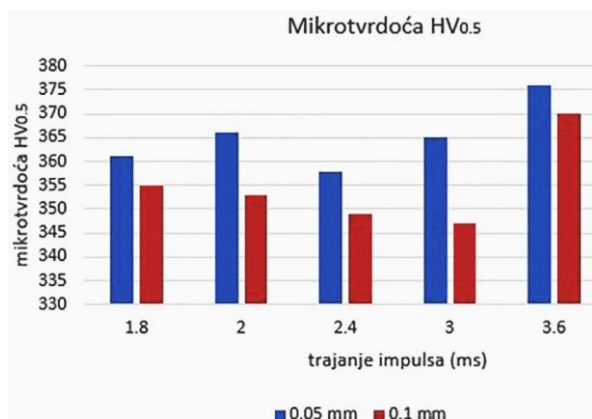
Frekvencija impulsa (Hz)	Trajanje impulsa (ms)	Površina rasprskavanja oko rupa, PR (mm <sup>2</sup> )
5	3.6	0.0400
5	3	0.0390
5	2.4	0.0385
5	2	0.0353
5	1.8	0.0183
7	3.6	0.0523
7	3	0.0450
7	2.4	0.0429
7	2	0.0400
7	1.8	0.0340
9	3.6	0.1168
9	3	0.1140
9	2.4	0.1062
9	2	0.0930
9	1.8	0.0860

Lasersko bušenje materijala povezano je sa nekim nedostacima, kao što je formiranje sloja rasprskavanja. Rasprskavanje materijala je materijal koji nije eksplodiran kroz rupu, već se lepi i zadržava oko rupe. Formiranje sloja rasprskavanja je nepoželjno i može se ukloniti dodatnim postupkom završne obrade. Površina i zapremina rasprskavanja materijala zavise od parametara lasera, kao i vrste i debljine materijala. U Tabeli 9. su date izmerene vrednosti površine rasprskavanja oko rupa u zavisnosti od frekvencije i trajanja impulsa. Površina rasprskavanja se povećava i sa porastom trajanja impulsa i sa porastom frekvencije impulsa. Međutim, na površinu rasprskavanja znatno više utiče frekvencija impulsa od trajanja impulsa.

Na slici 3 su prikazane vrednosti mikrotvrdoća izmerenih na udaljenosti od rupe 0,05 mm i 0,1 mm na limu debljine 2mm. Analizom slike 3 može da se zaključi da mikrotvrdoće merene bliže rupi imaju veće vrednosti. Proces bušenja laserom je uticao na povećanje vrednosti mikrotvrdoće. Takođe, primećeno je da su veće frekvencije dale



nešto veće vrednosti mikrotvrdoće, dok trajanje impulsa nije pokazalo neku приметnu zavisnost.



Slika 3. Grafički prikaz mikrotvrdoća HV<sub>0.5</sub> na udaljenosti od otvora a) 0.05 i b) 0,1 mm

Figure 3. The microhardness measurements at the distance of the hole a) 0.05 i b) 0,1 mm

Veće vrednosti mikrotvrdoća usled većih frekvencija objašnjavaju se kraćim vremenom hlađenja materijala kod većih frekvencija. Lasersko zračenje povećava tvrdoću materijala usled superbrzog zagrevanja i hlađenja i izdvajanja karbida velikih tvrdoća.

Tabela 10. Rezultati EDS analize otvora na slici 4

Table 10. Results of EDS analysis of the hole denoted in Fig.4

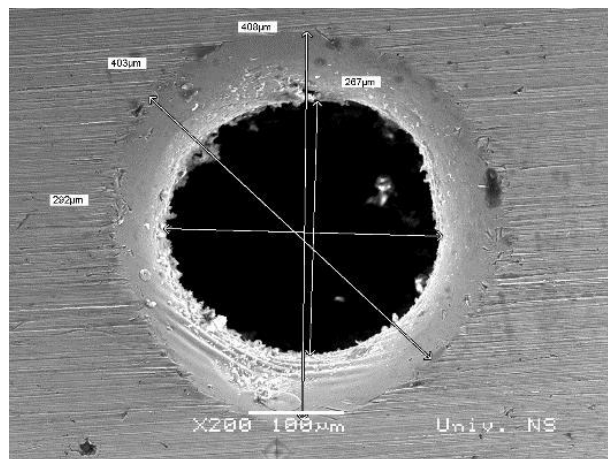
Ispitivani uzorak	Sadržaj elemenata (u atomskim procentima)									
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	2,62	0,34	2,86	21,82	0,83	0,53	19,33	49,07	2,6	100,00
Spectrum 2	0,38	0,4	1,63	19,02	0,28	0,52	20,39	51,29	6,09	100,00

U otvoru je povećan sadržaj Al, Ti, Cr, Mn, a smanjen sadržaj Co, Ni, i Mo. Smatramo da je, zbog visokih temperatura i velikih gustina snaga usled interakcije lasera sa materijalom, došlo do stvaranja karbida, a pretpostavku potpešuje visok sadržaj Ti, Cr i Mn. Karbidi koji se stvaraju tokom laserske radijacije su karbidi Ti, Cr i Mn. Takođe, tokom stvaranja karbida dolazi do smanjenja Ni i Co. Formiranjem karbida Ti dolazi do osiromašnja ovih zona  $\gamma'$  intermetalnim jedinjenjem Ni (Ti, Al) za čije stvaranje je potreban Ti. Karbidi Ti i Cr imaju veću tvrdoću od osnovnog materijala pa su rezultati EDS analize u saglasnosti sa dobijenim vrednostima mikrotvrdoća. Vrednosti mikrotvrdoća u ovim oblastima su u odnosu na osnovnu strukturu povećane, što ide u prilog prethodnim razmatranjima.

#### 4.2. Lasersko rezanje materijala

Nimonic 263 legura je klasifikovana kao materijal problematičan za rezanje konvencionalnim metodama zbog nekih poboljšanih osobina kao što su visoka sila smicanja, niska toplotna provodljivost, tendencija hemijske reakcije na visokim

Na slici 4 prikazan je otvor snimljen skenirajućim elektronskim mikroskopom JEOL - JSM 6460LV, a u tabeli 10 su rezultati energo-disperzivne spektrometrijske analize (EDS).



Slika 4. Ulazna strana rupe snimljena SEM-om (2.4ms, 9Hz, 136W)

Figure 4. Enter side hole taken by SEM (2.4ms, 9Hz, 136W)

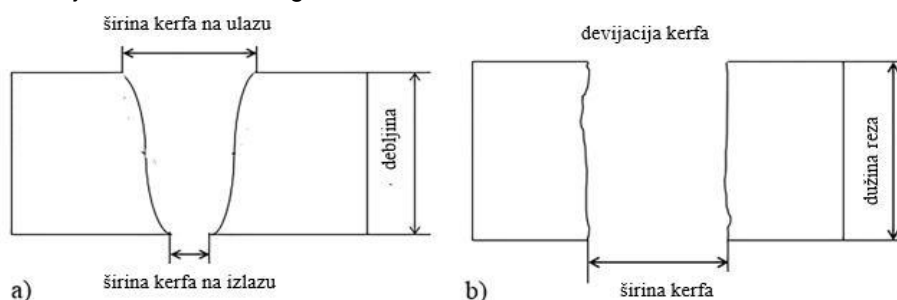
temperaturama, čestice abrazivnih karbida u mikrostrukturi i tendencija nagrizanja [2 - 4]. Glavni problemi pri obradi ove legure sa tradicionalnim procesima obrade (struganjem, glodanjem, bušenjem ili bušenjem) predstavljaju kratak radni vek alata i ozbiljnu površinsko oštećenje obrađenog radnog komada. Tako se lasersko rezanje pojavilo kao perspektivno sredstvo za obradu ove legure.

Kvalitet rezanja laserom zavisi od dobrog izbora parametara lasera, svojstva materijala i parametri rezanja [66,67]. Važne izlazne karakteristike laserskog rezanja su širina reza, konus reza, površinska hrapavost, brzina skidanja materijala i odsustvo skrame. Rez je materijal koji se uklanja rezanjem, odnosno geometrijski oblik tog materijala. Širina reza i suženje reza pokazuju stepen tačnosti, dok stopa uklanjanja materijala opisuje brzinu proizvodnje i ekonomičnost obrade [68], a površinska hrapavost određuje lokalnu koncentraciju napona.

Parametri procesa koji se smatraju kontrolnim faktorima u ovom eksperimentu su: pritisak gasa (azota), položaj fokusa, snaga lasera i brzina rezanja. Opšti efekat laserske snage je da omogućiti



rezanje većim brzinama, tako da ostavlja manje vremena da se toplota difunduje bočno i na taj način omogućava usku zonu uticaja toplote (ZUT). Optimalna upadna snaga radnog predmeta se utvrđuje tokom razvoja procedure, jer se sa nedovoljnom snagom, ne može pokrenuti rezanje. Veličina spota na površini određuje intenzitet snage na površini komada. Optimalno rezanje može se postići minimalnom veličinom spota smeštenim ispod površine materijala. Gas koji se koristi u procesu rezanja je od velikog značaja za proizvodnju visokog kvaliteta reza bez skrame, jer ne dozvoljava da se kapljice lepe i očvršćavaju u unutrašnjosti reza. Važnost pomoćnog gasa se povećava s povećanjem debljine materijala. Azot je najčešći inertni gas, jer je relativno jeftin i često se koristi za proizvodnju rezova visokog kvaliteta.



Slika 5. Geometrijske karakteristike reza a) poprečni presek, b) pogled odozgo

Figure 5. Geometrical characteristics of the kerf a) cross-section, b) top view

Rezanjem se može postići vrlo uzak "rez", što daje značajnu uštedu u materijalu. "Rez konus" ( $K_t$ ) ili stepen suženja reza je dobijen merenjem nagiba zida reza ( $w_t-w_b$ ) sa gornje strane ivice kao što je prikazano na slici 7. Stepenn suženja reza (3) se izračunava sledećim odnosom:

$$K_t = \theta = \tan^{-1} \left( \frac{w_t - w_b}{2t} \right) \quad (3)$$

gde je  $w_t$  najveća širina "reza",  $w_b$  je donja širina "reza", a  $t$  je debljina radnog komada.

Širina reza ( $w_t$ ) je širina gornjeg reza; devijacija reza ( $K_d$ ) (4) je razlika između maksimalne i minimalne širine gornjeg reza merena duž dužine reza [69]. Ovo se može pisati kao:

$$K_d = \text{maximum } kw - \text{minimum } kw \quad (4)$$

Površinska morfologija/topografija igra važnu ulogu u performansama delova različitih mašina. Visoka površinska hrapavost stvara lokalnu koncentraciju napona i ubrzava pojavu prslina. Za primene gde se zahteva otpornost na habanje potrebno je uklanjanje grube površine.

Beskontaktno merenje profila zasniva se na interferenciji između bele svetlosti reflektovane od površine uzorka i referentne površine. Srednja hrapavost ( $R_a$ ) (5) je aritmetička sredina apsolutnih vrednosti koordinata profila hrapavosti:

Brzina rezanja mora biti uravnotežena brzinom protoka gasa i snagom snopa. Kako se brzina rezanja povećava, veća je verovatnoća da skrama ostane na donjoj strani. Kada je brzina rezanja preniska, kvalitet ivice je lošiji i širina ZUT-a se povećava. Generalno, brzina rezanja materijala je obratno proporcionalna njegovoj debljini.

Broj karakteristika kvaliteta izlaza, identifikuje se za optimizaciju na sledeći način: stepen suženja reza, devijacija reza, mikrotvrdoća, postojanje očvrslilih kapljica i skrame, površinska hrapavost i njena srednja kvadratna vrednost i rastojanje od najvišeg gornjeg i donjeg vrha.

Na slici 5. prikazane su geometrijske karakteristike reza, potrebne za definisanje kvaliteta reza.

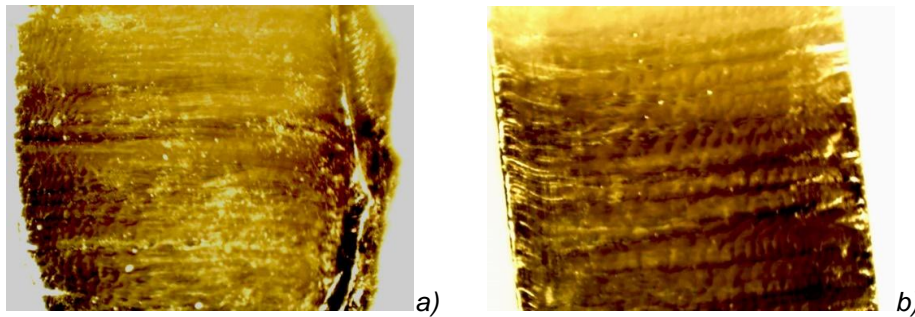
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j| \quad (5)$$

Koren srednjih kvadrata hrapavosti ( $R_{ms}$ ) (6) je srednja kvadratna prorezna vrednost koordinata profila hrapavosti. Ovo je prosek izmerenih odstupanja visine uzetih u okviru evaluacije dužine i merene od srednje linije:

$$R_{ms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2} \quad (6)$$

Prorezna gornji-donji vrh hrapavosti, bazirana je na jednom gornjem i jednom donjem vrhu po dužini uzorkovanja.

Slike 6a i 6b prikazuju površine snimljene optičkim mikroskopom nakon procesa laserskog rezanja pre i posle optimizacije. Slika 6a prikazuje mikrostrukturu dobijenu ne optimizovanim parametrima:  $N_p = 8$  bar;  $f =$  na dnu materijala;  $P = 2100$  kV;  $v = 4000$  mm / min. Može se primetiti da tok brazda ima dve različite zone. Sa vrha rezne ivice do dubine penetracije otprilike 1,6 mm, zona za rezanje je glatka, a brazde su ravne i paralelne. U drugoj zoni brazde postaju neregularne, neparalelne, bez jasnog pravca, a na krajevima se vidi zaostala zalepljena skrama.



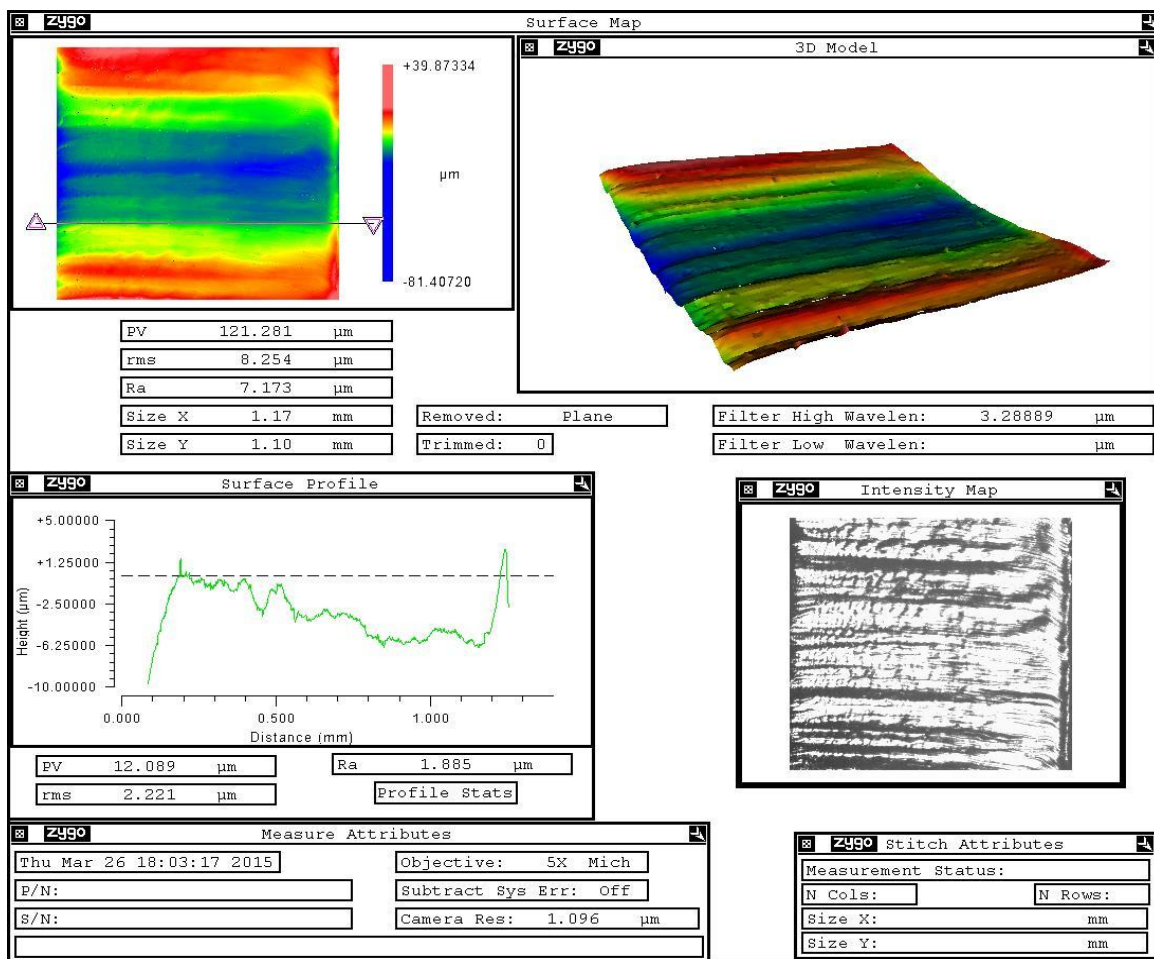
Slika 6. Mikrostruktura Nimonic 263 legure rezana laserom a) optimizovanim parametrima, b) neoptimizovanim parametrima. Uvećanje 30 x

Figure 6. Microstructure of Nimonic 263 alloys obtained with a) optimized parameter setting, b) non-optimized parameter setting. Magnification 30 x

Slika 6b prikazuje strukturu nakon optimizacije. Primetno je da su brazde gotovo paralelne i ravne duž celog područja rezanja. Gotovo nije bilo nalepljenog materijala.

Devijacija "reza" (Kd) i stepen suženja "reza" (Kt) reza dobijene optimizovanim parametrima su bile 0,057 mm i 0,9 mm. Mikrotvrdoća (HV) opti-

zovanog područja reza je 230 HV1; mikrotvrdoća dobijena optimizovanim procesom predstavlja prednost za strukturu. Optimizovani parametri procesa laserskog rezanja pružili su uniformnu strukturu sa uskim i ivičnim paralelnim "rezom", sličnost u geometriji obrade, visokim kvalitetom ivice i minimalnim otpadom materijala.



Slika 7. Prikaz 2D profila i 3D mape strukture Nimonic 263 izrezane laserskim snopom, izmerene na profilometru Zygo NewView 7100

Figure 7. Micrographs, two-dimensional profile and 3D maps of Nimonic 263 sheet: cut with laser beam, measured on the Zygo NewView 7100 profilometer

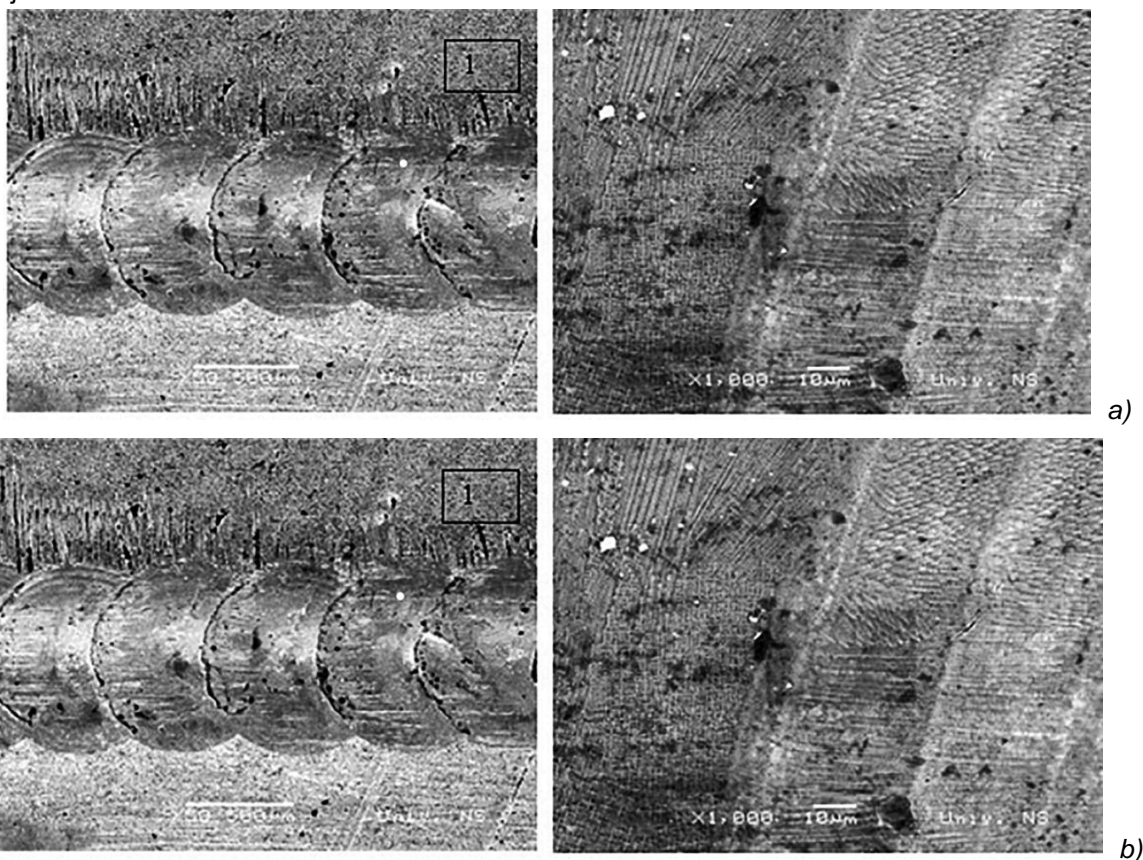
Na slici 7 prikazani su 2D profili i 3D mape oblasti posle rezanja laserskim snopom optimizovanim parametrima. Lasersko rezanje sa optimizovanim parametrima dalo je glatku površinu rezanih delova i homogenu strukturu. Prosečna hrapavost (Ra) optimizovanog laserskog reznog materijala iznosila je 5,2 mm, dok je Ra neoptimizovanog reznog dela bio 10,5 mm. PV (predstavlja maksimalnu razliku između gornjeg i donjeg vrha površinskog profila) odnos optimizovanog laserskog reza je 106,6 mm, a PV odnos ne optimizovanog reza je 159,9 mm. Optimizovani parametri poboljšavaju površinske karakteristike rezanog materijala čak i do 100%.

#### 4.3. Zavarivanje laserom

Rezultati ispitivanja zatezanjem pokazuju da se lomovi javljaju u šavu zavarenog materijala. Zatezna čvrstoća je 432MPa što je oko 85% od zatezne čvrstoće osnovnog materijala. Razlog je verovatno u tome što nije korišćen dodatni materijal u morfologiji spajanja tokom laserskog procesa.

Mehaničke osobine se razlikuju zbog nehomogene raspodele čestice sekundarne faze taloženja kao i mikrosegregacije u međudendritnom području.

Slika 8 predstavlja frontalni, spoljni izgled zavarenog spoja, a na slici 8b) je dat detalj sa slike 8a).



Slika 8. a) Spoljni izgled šava zavarenog laserom b) detalj 1 sa slike 8a)

Figure 8. a) External appearance of welded joint formed during laser welding b) detail 1 in Figure 8a)

Na slici 8b) uočava se dendritna struktura nastala verovatno kao posledica velikih brzina očvršćavanja tečnog metala. Različito orijentisane dendritne strukture ukazuju na drugačiju orijentaciju zrna. Rezultati EDS analize spektra 1. sa slike 8b) navedeni su u tabeli 11. i sugerišu da je ovo TiC dendritna struktura. Intersticijske faze sa visokom tačkom topljenja, dobre temperaturne stabilnosti i otpornosti na habanje, MC (u ovom slučaju TiC) su važne faze, jer utiču na ojačavanje superlegura nikla i železa, kao i mnogih drugih materijala visoko otpornih na habanje [70].

Mikrostrukturne promene izazvane formiranjem MC karbida i njihovom deformacijom su dva važna predmeta za istraživanje materijala ojačanih MC karbidima. MC karbid je, ili pravilnog oktaedarskog oblika ili neregularne cilindrične morfologije, u uslovima sporog hlađenja [70].

Pri kvazi-brzom očvršćavanju strukture, MC-karbid ima dobro razvijenu dendritnu morfologiju. Mikrostruktura MC dendrita se razlikuje od onih klasičnih dendrita u metalnim materijalima, njegova površina je mnogostrana u poređenju sa konvencionalnim.

Tabela 11. Rezultati EDS analize na mestu 1 na slici 8 b

Table 11. Results of EDS analysis in spectrum 1 (denoted in Fig. 8b.)

Ispitivani uzorak	Sadržaj elemenata (u atomskim procentima)								
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Mesto 1	0,88	0,34	6,69	20,32	0,32	0,56	17,54	47,32	6,03

Slike 9a i 9b pokazuju mikrostrukture loma zavarenog spoja Nimonic 263 superlegure nakon ispitivanja zatezanjem. Uočeno je da su svi uzorci polomljeni u šavu metala. Takođe, mehaničke karakteristike zavarenih spojeva mogu se razlikovati od osnovnog materijala zbog nehomogene distribucije taloženja sekundarnih faza u zavarenim spojevima, kao i zbog mikrosegregacije u međudendritnim oblastima. Vizuelnom pregledom mikrofografija, uočava se da je površina preloma dosta ravnomerna sa jamicama veličine do 2  $\mu\text{m}$ . Jamice ukazuju na izvesnu duktilnost zavarenog spoja. Na prelomu se ne vidi preferencijalni put loma, a mogu se i jasno uočiti manje čestice. Jamičasti prelom ne ukazuje na postojanje zazora. U tabeli 12 navedeni su rezultati EDS analize na mestima označenim na

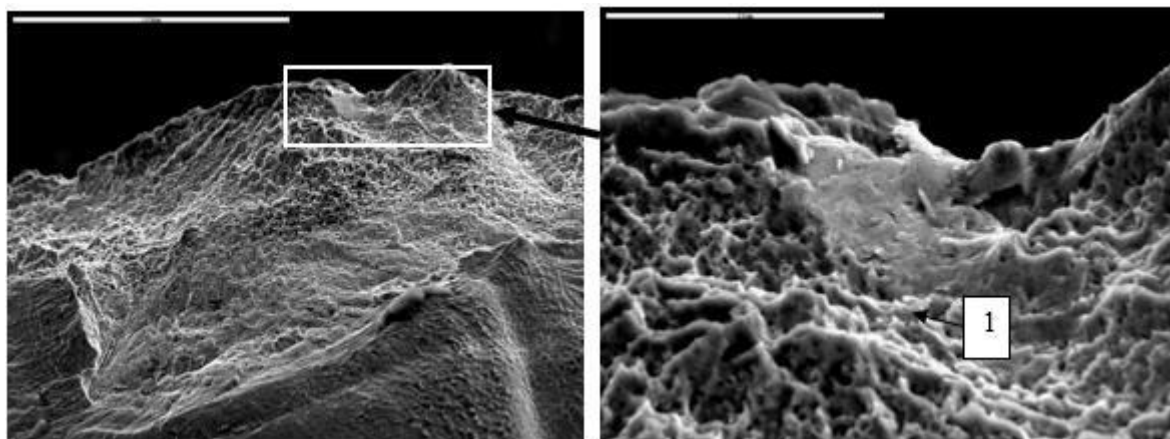
Tabela 12. Rezultati EDS analize na mestu 1 na slici 9 b

Table 12. Results of EDS analysis in spectrum 1 (denoted in Fig. 9b)

	Sadržaj elemenata (u atomskim procentima)								
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Mesto 1	3,36	0,32	1,65	20,09	0,35	0,56	19,32	49,28	5,07

slici 9. Rezultati EDS analize otkrivaju mikrostrukturne promene indirektno, upoređujući spektre pre i posle tretiranih površina laserom (LSP). Utvrđeno je da LSP-lasersko deformaciono ojačavanje materijala uzrokuje obrazovanje sekundarnih faza u termomehaničkim tretiranim uzorcima [71]. Obrazovanje sekundarnih faza u superleguri NIMONIC 263 je posledica različitih temperatura topljenja elemenata koji su prisutni u ispitivanom materijalu. Analiza na SEM-u u kombinaciji sa EDS je ukazala je da su se izdvojile čestice aluminijum oksida, veličine 0,5 $\mu\text{m}$ .

Postojanje ovih čestica na površini loma sugerišu da su mikro šupljine počele na granici čestica / matrica.



a)

b)

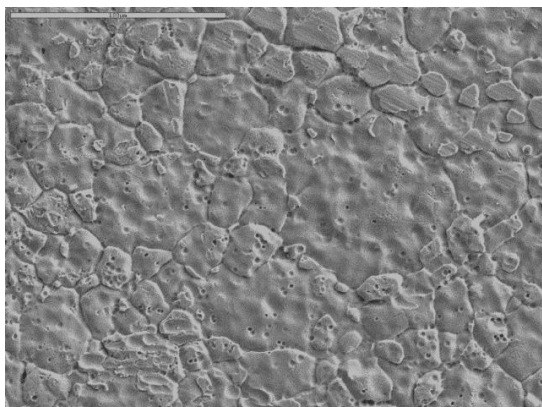
Slika 9. a) Mikrostruktura materijala posle ispitivanja zatezanjem i b) detalj sa slike 9a. Barovi su levom gornjem uglu označavaju a) 100 $\mu\text{m}$ , b) 20  $\mu\text{m}$

Figure 9. a) Microstructure of materials after tensile test and b) detail denoted in Fig. 9a. Bars in the left upper corner indicate a) 100  $\mu\text{m}$ , b) 20  $\mu\text{m}$

#### 4.4. Lasersko deformaciono ojačavanje materijala

Mikrostruktura osnovnog, materijala Nimonic 263 legure je prikazana na slici 10. Struktura površine superlegure Nimonic 263 pre primenjene

laserske obrade bila neravnomerna, sa prisutnim porama i dekohezijom granice zrna. Izračunata srednja veličina zrna iznosi  $F_m=232,45 \mu\text{m}$  [72].



Slika 10. Mikrostruktura osnovnog materijala Nimonic 263 (SEM)

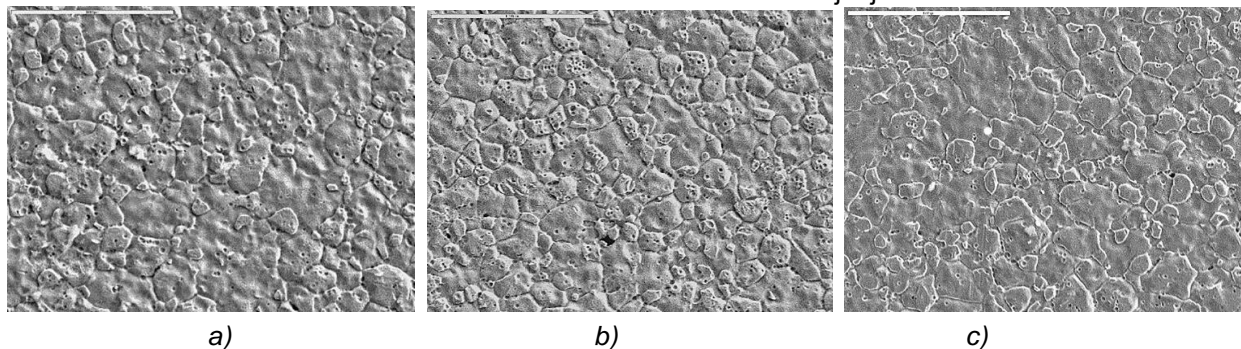
Figure 10. Microstructure of the base material of Nimonic 263 before laser treatment (SEM)

Interakcija pikosekundnog laserskog zračenja sa metalima je kompleksan proces, kao što je predstavio Bauerle [73], jer uključuje nekoliko fizičkih procesa. Ova interakcija se može objasniti kao apsorpcija laserske energije slobodnim elektronima, što početno vodi ka elektron-elektron kolizijama. Ovo je praćeno prenosom energije na rešetke fonona koji mogu dovesti do deformacije i pucanja veza rešetki i konačno topljenja ili isparavanja, ako se primeni dovoljna količina energije. Dobijeni površinski efekti u velikoj meri zavise od specifičnih parametara operativnog lasera (talasna dužina, trajanje impulsa, energija, itd.) i stanja površine uzorka (hrapavost, koeficijent apsorpcije, itd.). Tretiranje površine impulsnim laserskim svetlom sa trajanjem pikosekundnog impulsa može biti praćeno formiranjem tečne faze koja može smanjiti preciznost obrade, što je razmatralo Bauerle [73].

Udarni talasi izazivaju promene mikrostrukture u blizini površine materijala i uzrokuju visoku gustinu dislokacija. Prema nekim navodima kombinovani efekat promena mikrostrukture i nagomilavanja dislokacija doprinosi poboljšanju mehaničkih osobina u blizini površine [58,59]. Lasersko deformaciono ojačavanje materijala poboljšava otpornost na zamor, koroziju i otpornost na habanje metala kroz mehaničke efekte koji nastaju udarnim talasima [58].

Slika 11 prikazuje mikrostrukturu nakon laserskog deformacionog ojačavanja pikosekundnim laserskim svetlom na talasnoj dužini od 1064 nm, impulsnom energiji od 10 mJ i broju impulsa 50, 100 i 200, respektivno. Analiza morfoloških promena na leguri NIMONIC 263 nastalih pri datim parametrima dejstva laserskog deformacionog ojačavanja materijala (Laser Shock peening processing) urađena je skenirajućim elektronskim mikroskopom. Nastale su morfološke promene na leguri usled delovanja laserskog zračenja gustine energije  $3,3 \text{ GW/cm}^2$ , pri impulsnom energiji 10mJ i nakon 50, 100 i 200 akumuliranih laserskih impulsa. Delovanjem 100 i 200 akumuliranih impulsa na površinu ispitivanog materijala dovelo je do pojave izraženih kratera i pukotina na površini. Kada se poveća broj akumuliranih impulsa mikrostruktura postaje finija, ali nakon 200 impulsa dolazi do parcijalnog topljenja materijala.

Prilikom obrade materijala na 1064 nm laserskoj dužini, impulsna energija je bila 2 mJ, 10 mJ i 15 mJ, a broj impulsa 50, 100 i 200. Najfinija mikrostruktura je dobijena pri impulsnom energiji od 10 mJ (predstavljena na slici 11), kako energija impulsa 15 mJ indukuje ne samo mehaničke, već i termičke promene. Povećanje impulsne energije dovodi do smanjenja veličine zrna.



Slika 11. Mikrostruktura Nimonic 263 legure posle mehaničke obrade laserom energijom impulse 10 mJ ( $F = 0.2 \text{ J cm}^{-2}$ ), talasne dužine 1064 nm, i broja impulsa a) 50, b) 100 i c) 200. Bar u gornjem levom uglu označava  $100 \mu\text{m}$

Figure 11. The microstructure of Nimonic 263 after LSP by laser pulse energy of 10mJ ( $F = 0.2 \text{ J cm}^{-2}$ ), wavelength of 1064 nm, and number of pulses a) 50, b) 100 and c) 200 respectively. Bar in the upper left corner denotes  $100 \mu\text{m}$

Proces mehaničke obrade prati značajne promene u mikrostrukturama i fazama blizu površine. Promene u mikrostrukтури, izazvane dejstvom laserskog snopa, tipične su za ovu superleguru i mogu

se sumirati kao formiranje karbida - TiC, CrC i (Ti, Mo) C, koji segregiraju na zrna i na granicama zrna [70].

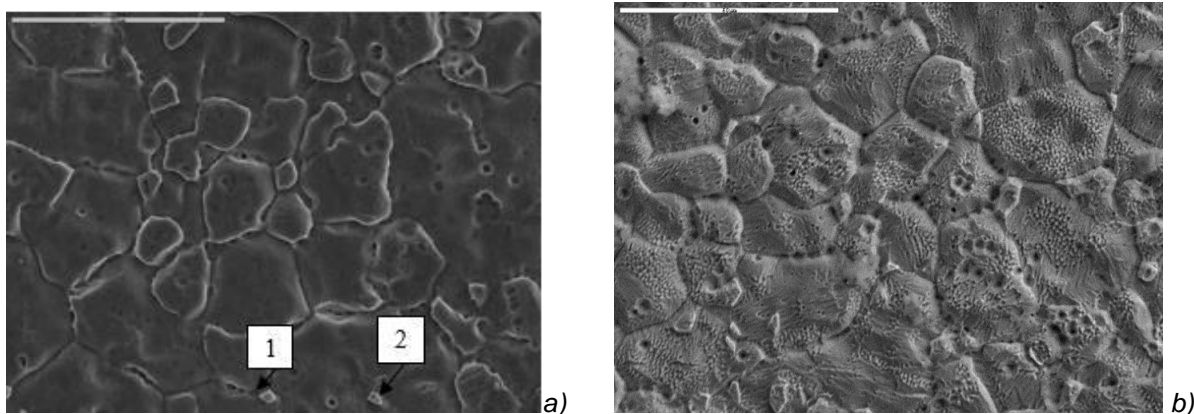


Na slici 12a prikazani su izdvojeni mikrokonstituenti, a primenom energiodisperzivne spektrometrijske analize (EDS) čije su brojčane vrednosti date u Tabeli 13 (EDS pikovi 1 i 2), analizirana je mikrostruktura faza koje se izdvajaju u zrnu i na granicama zrna, označenih na slici 12 a. Rezultati u tabeli 13 potvrđuju na postojanje TiC.

Titanium monokarbid (TiC) je veoma tvrd i stabilan na visokim i niskim temperaturama. (Ti,

Mo) C je karakteristična strukturna komponenta koja snažno utiče na mehaničke i fizičke osobine materijala, kao što su razmatrali Chena et al. [74].

Na slici 12b prikazana je mehanička obrada nepovoljnim režimima obrade, talasne dužine 532nm. Sa slike se vidi struktura koja podseća na morske korale i koja se formirala na zrnima i predstavlja povoljna mesta za akumuliranje lokalnih napona.



Slika 12. Mikrostrukture nastale laserskim deformacionim ojačavanjem a) 1064nm b) 532 nm. Bar u levom gornjem uglu označava 50  $\mu$ m

Figure 12. Microstructure formed during LSP at a) 1064nm b) 532 nm. Bar in the upper left corner denotes 50  $\mu$ m

Tabela 13. Rezultati EDS analize spektara 1 i 2 označenih na slikama 12 i 13.

Table 13. Results of EDS analysis in spectrum 1 and spectrum 2 denoted in Fig.12 and Fig. 13

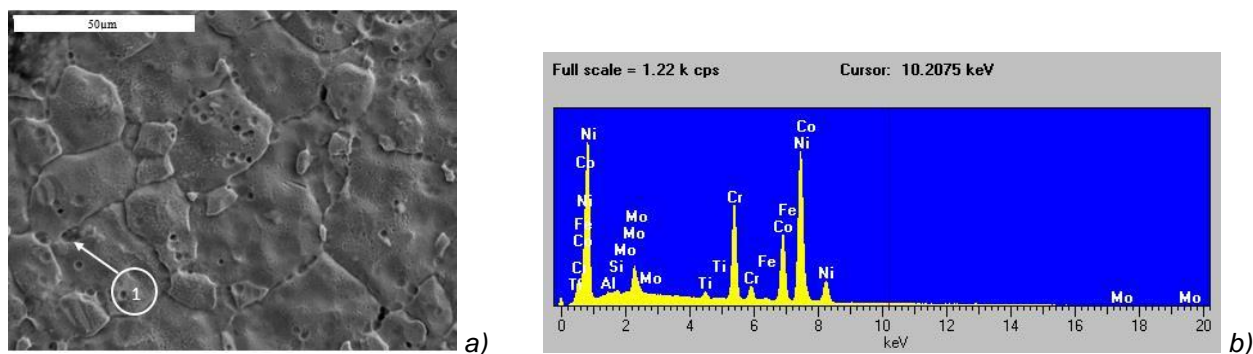
Ispitivani uzorak	Sadržaj elemenata (u atomskim procentima)									
	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Spektar u tački 1 sl. 12a	13,25	0,13	0,2	25,94	9,66	0,34	0,24	8,82	21,98	19,45
Spektar u tački 2 sl. 12a	12,96	0,18	0,25	20,15	11,50	0,37	0,29	11,12	27,43	15,77
Spektar u tački 1 sl. 13a		0,5	8,54	2,22	16,50	0,37	0,54	14,17	45,54	5,34

Na slici 13a predstavljena je mikrostruktura nastala posle mehaničke obrade laserom (energija impulsa 2mJ, broj impulsa 100, talasna dužina 1064 nm). Rezultati prikazani u tabeli 13 koji se odnosi na spektar u tački 1 na slici 13a, ukazali su na postojanje čestica karbida tipa TiMo. Prisustvo TiMo karbida je nepoželjno u mikrostrukturi jer su uzrokovali pojavu prslina u ispitivanom materijalu.

Morfologija površine je od velikog značaja za rad raznih delova mašina. Površinska hrapavost ukazuje da površina nije perfektno ravna i prema tome, koncentracije napona malih veličina mogu da se pojave duž površine materijala. Usled opterećenja usled zamora prslina uvek nastaju na slobodnim površinama. Visoka površinska hrapavost stvara koncentraciju lokalnih napona i ubrzava stvaranje prslina. Kod primene materijala za delove gde se traži otpornost na habanje neophodno je ukloniti hrapavu površinu.

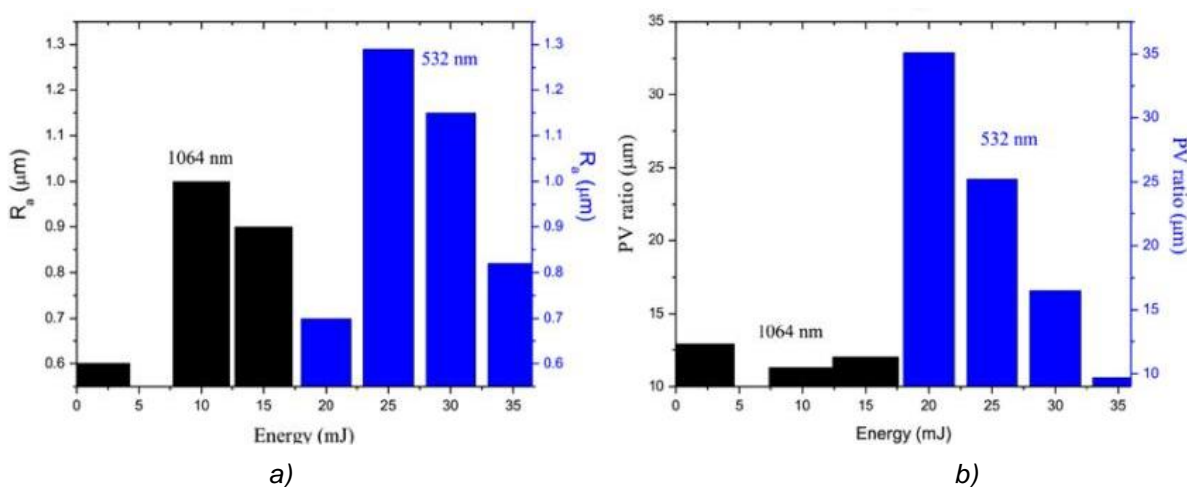
Dijagram na slici 14 pokazuje da je najviši porast vrednosti srednje hrapavosti Ra v nakon 25 mJ laserske energije na 532 nm talasne dužine. Sa daljim povećanjem laserske energije, prosečna hrapavost se smanjuje. Analiza rezultata površinskih parametara u odnosu na povećanje broja impulsa pokazuje da nema značajnih promena u Ra vrednosti. Što se tiče odnosa PV, analiza profilometrije pokazuje neznatne oscilacije koeficijenta PV (odnos predstavlja maksimalnu razliku između gornjeg i donjeg vrha površinskog profila). PV odnos je jedna od načina da se prikaže odstupanje od stvarne hrapavosti površine u odnosu na idealnu, odnosno površinu bez defekata. Sa povećanjem impulsa energije na 1064 nm, kao što se vidi iz slika 14b. Na 532 nm talasne dužine, opadajući trend odnosa PV je primetan kada se primenjuju veće vrednosti energije (sl. 14b). Dobijeni rezultati pokazuju da se bolje površinske karakteristike dobijaju pri talasnim dužinama od 1064nm, lošije pri talasnim dužinama od 532 nm.





Slika 13. a) Mikrostruktura superlegure Nimonik 263 nakon laserskog deformacionog ojačavanja sa izdvojenim mikrokonstintuentom b) EDS analiza za mikrokonstintuent označen na slici 13a

Figure 13. a) Microstructural changes of Nimonic 263 superalloy caused by LSP treatment with the secondary phase arisen after laser treatment b) EDS patern for the secondary phase shown in Figure 13a



Slika 14. Dijagrami parametara površinske morfologije superlegure Nimonik 263 u odnosu na energiju lasera posle akumuliranih 50 impulsa a) srednja hrapavost ( $R_a$ ) i b) maksimalna razlika gornjeg i donjeg vrha (PV) pri talasnim dužinama od 532 nm i 1064 nm

Figure 14. Diagrams of Nimonic 263 surface morphology parameters with respect to the laser energy, after 50 accumulated pulses: (a) average roughness ( $R_a$ ) and (b) peak to valley (PV) ratio at wavelengths of 532 nm and 1064 nm.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata prikazanih u radu može se zaključiti sledeće:

- Obrada materijala laserom pruža mnogo prednosti u odnosu na konvencionalne metode;
- Bušenje rupa laserom daje malu zonu uticaja toplote, precizne ulazne i izlazne rupe sa cirkularnošću bliskoj jedinici, povoljan odnos dubina-prečnik, male stepene suženja rupe. Negativne aspekte bušenja laserom kao što je rasprskavanje oko rupe se smanjuje ili otklanja optimizacijom parametara bušenja;
- Najbolje vrednosti odnosa dubina-prečnik su postignute za trajanje impulsa od 1,8ms
- Rezanjem materijala laserom dobijaju se glatke površine, paralelan i uzak rez, mala hrapavost, mali stepen suženja reza i površine bez prslina.

- Laserskim deformacionim ojačavanjem ispitivanog materijala se usitnjavaju zrna, dobijaju se mikrokonstintuenti koji poboljšavaju mehaničke osobine materijala, povećava se mikrotvrdoća. Površinske karakteristike materijala nakon laserskog deformacionog ojačavanja su povoljnije, najbolje rezultate daju parametri lasera 1064 nm i energija od 15 mJ.

## Zahvalnost

Rad je nastao zahvaljujući pomoći Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoja i finansiran je sa projekata [TR 37021 i TR35040].

## Acknowledgement

This work has been supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development, Serbia [Projects TR37021 i TR35040].

## 6. LITERATURA

- [1] G.Murthy, S.Ghosh, M.Das, G.Das, R.N.Ghosh (2008) Correlation between ultrasonic velocity and indentation-based mechanical properties with microstructure in Nimonic 263, *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2), 398–405.
- [2] R.Reed (2006) *The Superalloys, Fundamentals and Applications*. USA: Cambridge University Press, New York.
- [3] Ch. Thomas, Sims and William C.Hagel (1972) *The superalloys*, New Yourk, Wiley-Interscience, p.614.
- [4] B.F.Scott (1976) Laser machining and fabrication - A review, 17. *International Machine Tool Design and Research Conference*, Birmingham, Macmillan Press, proceedings, p.335-339.
- [5] J.Dietrich, M.Brajdic, K.Walthner, A.Horn, I. Kelbassa, R. Poprawe (2008) Review Investigation of increased drilling speed by online high-speed photography, *Optics and Lasers in Engineering*, 46, 705–710.
- [6] M.J. Jackson, W. O'Neill (2003) Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 517–525.
- [7] S.A.Milosavljevic, D.Milovanovic, M.Momcilovic, Z. Radovanovic (2011) Influence of picosecond laser pulses on the microstructure of austenitic materials, *Journal of Russian Laser Research*, 32(6), 564-571.
- [8] K.Ding, L.Ye (2006) *Laser Shock Peening, Performance and Process Simulation*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, p. 50–53.
- [9] J.Schijve, (2001) *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publisher: Dordrecht, the Netherlands, p. 71–78.
- [10] C.Y.Yeo, S.C.Tam, S. Jana, M.W.S. Lau (1994) A technical review of the laser drilling of aerospace materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 42(1), 15–49.
- [11] B.S.Yilbas (1997) Parametric study to improve laser hole drilling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 70(1-3), 264–273.
- [12] G.Chryssolouris, G.Tsoukantas, K.Salonitis, P. Stavropoulos, S.Karagiannis (2003) Laser machining modelling and experimentation— an overview, 3.GR-International Conference on New Laser Technologies and Applications, San Diego, CA, United States, proceedings, (5131), p.158–168.
- [13] W.K.Hamoudi, B.G.Rasheed (1995) Parameters affecting Nd:YAG laser drilling of metals, *International Journal of Joining Materials*, (7), 63–69.
- [14] S.Petronic, A.Milosavljevic, Z.Radakovic, P. Drobnjak, I.Grujic (2010) Analysis of geometrical characteristics of pulsed Nd:YAG laser drilled holes in superalloy Nimonic 263 sheets, *Technical Gazette*, 17 (1), 61–66.
- [15] N.D.Pandey, H.S.Shan, A.Bharti (2006) Percussion drilling with laser: hole completion criterion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(9-10), 863–868.
- [16] K.Salonitis, A.Stourmaras, G.Tsoukantas, P. Stavropoulos, G.Chryssolouris (2007) A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 96–103.
- [17] Y.H.Chen, S.C.Tam, W.L.Chen, H.Y.Zheng (1996) Application of Taguchi method in the optimisation of laser micro-engraving of photomasks, *International Journal of Materials & Product Technology*, 11(3/4), 333–344.
- [18] S.Bandyopadhyay, H.Gokhale, J.K.Sarin Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi (2005) A statistical approach to determine process parameter impact in Nd:YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4 V sheets, *Optics and Lasers in Engineering*, 43(2), 163–182.
- [19] A.S.Kuar, B.Doloi, B.Bhattacharyya (2006) Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO<sub>2</sub>), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1301–1310.
- [20] T.Sibaliija, S.Petronic, V.Majstorovic, R. Prokic-Cvetkovic, A. Milosavljevic (2011) Multi-response design of Nd:YAG laser drilling of Ni-based superalloy sheets using Taguchi's quality loss function, multivariate statistical methods and artificial intelligence, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8), 537-552.
- [21] G.Chryssolouris (1991) *Laser Machining Theory and Practice*, Springer Verlag, New York.
- [22] W.M.Steen, J.Mazumder (2010) *Laser Material Processing*, 4th Edition, Springer Science & Business Media, New York.
- [23] M.Gostimirović (2016) Nekonvencionalni postupci obrade, FTN Izdavaštvo Novi Sad.
- [24] P.Schafer (1998) Cutting by means of pulsed solid state lasers 5<sup>th</sup>. *International Conference on Lasers in Manufacturing*, Berlin, Germany, Proceedings p.3–14.
- [25] A.Cekic, D.Begic-Hajdarevic, M.Kulenovic, A. Omerspahic (2014) CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Alloy Steels using N<sub>2</sub> Assist Gas, *Procedia Engineering*, 68, 310-315.
- [26] N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S.H. Cheraghi (2003) CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 43, 351–358.
- [27] E.Libreria, G.Riva, H.Safarzedeh, B.Previtali (2015) On the use of Areal Roughness Parameters to Assess Surface Quality in Laser Cutting of Stainless Steel with CO<sub>2</sub> and Fiber Sources, *Procedia CIRP*, 33, 533-538.
- [28] R.T.Brown, R.W.Frye (1995) High-brightness laser cutting and drilling of aerospace materials, *Laser materials processing conference, ICALEO'95: proceedings of the laser materials processing conference*; San Diego; CA, p.818-824.
- [29] G.Thawari, J.K.Sarin Sundar, G.Sundararajan, S.V. Joshi (2005) Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 229–239.
- [30] F.Quintero, J.Pou, F.Lusquinos, M.Boutinguiza, R. Soto, M.Perez- Amor (2000) The influence of the gas flow regime on the Nd:YAG laser cutting of mullite-alumina, FL : *Laser Institute of America, Orlando, Proceedings of the ICALEO*, p.B153–B160.
- [31] J.Pou, M.Boutinguiza, F.Quintero, F.Lusquinos, R.Soto, M. Perez- Amor (2000) Laser cutting of car interior trim panels reinforced by natural fibers FL : *Laser Institute of America, Orlando, Proceedings of the ICALEO*, p.F62–F71.

- [32] S.H.Lim, C.M.Lee, W.J.Chung (2006) A study on optimum cutting condition of a high speed feeding type laser cutting machine by using Taguchi method, *International Journal Precision Engineering and Manufacturing*, 7(1), 18–23.
- [33] S.Ghosh, B.P.Badgujar, G.L.Goswami (1996) Parametric studies of cutting zircaloy-2 sheets with a laser beam, *Journal of Laser Applications*, 8(3), 143–148.
- [34] D.Bicleanu, M.Brandt, H.Kaebnick (1996) An analytical model for pulsed laser cutting of metals, Detroit, MI (United States) *Proceedings of the ICALOE*, p.68–77.
- [35] B.C.Kim, T.H.Kim, Y.S.Jang, K.H.Chung (2001) Investigation of striation formation in thin stainless steel tube during pulsed Nd: Yag laser cutting process by numerical simulation, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(10), 2623–2632.
- [36] A.K.Dubey, V.Yadava (2008) Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, *Optics and Laser Technology*, 40(3), 562–570.
- [37] S.Petronic, B.Grujic, D. Milovanovic, R. Jovicic (2015) Optimisation of laser beam cutting process parameters of autenitic materials, 11th International Conference Structural Integrity of Welded Structures, Timisoara, Romania, p.235-240.
- [38] L.V.Shanjin, W.Yang An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Laser Engineering*, 44(10), 1067–1077.
- [39] I.A.Almeida, W.De Rossi, M.S.F.Lima, J.R. Berretta, G.E.C. Nogueira, N.U.Wetter, N.D. Vieira (2006) Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd:YAG laser parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 105–110.
- [40] G.Singh, R.V.Grandhi, D.S.Stargel (2010) Modified particle swarm optimization for a multimodal mixed-variable laser peening process, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(5), 769–782.
- [41] F.Quintero, J.Pou, F.Lusquinos, M.Boutinguiza, R. Soto, M.Perez-Amor (2000) The influence of the gas flow regime on the Nd:YAG laser cutting of mullite-alumina, DearBorn, MI USA, proceedings, p. B153–B160.
- [42] H.Chmelickova, M.Polak (2001) Nd:YAG pulsed laser cutting of metals, 39th International Conference on Experimental Stress Analysis, Tabor, Czech.
- [43] J.Mathew, G.L.Goswami, N.Ramakrishnan, N.K. Naik (1999) Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites, *Journal of Material Processing Technology*, (89–90), 198–203.
- [44] P.Annon (1976) Welding with the laser, *Metal Construction*, 8(2), 78-80.
- [45] W.Guo, S.Dong, W.Guo, J.A.Francis, L.Li (2015) Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel, *Materials Science and Engineering A*, 625, 65-80.
- [46] R.A.Buckson, O.A.Ojo (2014) Analysis of the Influence of Laser Welding on Fatigue Crack Growth Behavior in a Newly Developed Nickel-Base Superalloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 353-361.
- [47] K.Shinozaki, L.Xiangjun, H.Kuroki H.S.Makoto (2000) Comparison of hot cracking susceptibilities of various Ni-base superalloys by U-type hot cracking test - a study on laser weldability of Ni-base superalloys (Report 2)", *Welding Research Abroad*, 46(2), 22-31.
- [48] J.Qi, H.K.Wei, D.F.Zhang, L.Han (2014) Research on the laser welding technology of GH4169, *Applied Mechanics and Materials*, 633-634, 703-706.
- [49] J.R. Qi, H.K. Wei, Y.L. Li, L. Han (2014) Application of the laser welding technique in aircraft repair *Advanced Materials Research*, 887-888, 1269-1272.
- [50] K. Colic, S. Petronic, A. Sedmak, A. Milosavljevic, Z. Kovacevic (2011) Laser Welding Process of Stainless Steel Used for Biomedical Applications, *Journal of Welding and Material Testing, National R&D Institute for Welding and Material Testing - ISIM Timisoara*, 3, 16-19.
- [51] A.Odabasi, N.Unlu, G.Goller, E.S.Kayali, MN. Eruslu (2013) Assessment of the effects of heat input on microstructure and mechanical properties in laser beam welded Haynes 188 undermatched joints, *Materials Science & Engineering, A* 559, 731–741.
- [52] P.Jose, R.Berretta, W.De Rossib (2007) The Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels, *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, 45, 960-966.
- [53] T.Markovitsa, J.Takacs (2010) Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser, *Physics Procedia*, 5, 47–52.
- [54] E. Taban, E. Deleu, A. Dhooge, E. Kaluc (2009) Laser welding of modified 12% Cr stainless steel: Strength, fatigue, toughness, and microstructure and corrosion properties, *Journal of Materials and Design*, 30, 1193–1200.
- [55] P.Peyre, R.Fabbro, L.Berthe, C.Dubouchet (1996) Laser shock processing of materials, physical processes involved and examples of application, *Journal of Laser Applications*, 8(3), 135–141.
- [56] D.Devaux, R. Fabbro, L.Tollier, E.Bartnicki (1993) Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry, *Journal of Applied Physics*, 74(4), 2268-2273.
- [57] A.H.Clauer, J.H.Holbrook, B.P.Fairand (1981) Effects of laser induced shock waves. In: *ShockWaves and High-strain, Phenomena in Metals*, M.A.Meyers, L.E. Murr Eds.; Plenum Press: New York, USA, p.675–703.
- [58] B.S.Yilbas, S.Z. Shuja, A.Arif, M.A.Gondal (2003) Laser-shock processing of steel, *Journal of Materials Processing and Technology*, 135, 6–17.
- [59] T.Sibaliija, S.Petronic, V.Majstorovic, A. Milosavljevic (2014) Modelling and optimisation of laser shock peening using an integrated simulated annealing-based method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ,73(5-8), 1141-1158.
- [60] S.Petronic, T.Sibaliija, M.Burzic, S.Polic, K.Colic, D. Milovanovic (2016) Picosecond Laser Shock Peening of Nimonic 263 at 1064 nm and 532 nm Wavelength, *Metals*, 6 (3), 41.
- [61] A.Milosavljevic, S.Petronic, A.Kovacevic, Z. Kovacevic, Z. Stamenic (2013) Laser shock peening

- of N-155 superalloy after longtime service, Technical Gazette, 20(2), 323-327.
- [62] S. Petronic, D. Milovanovic, A. Milosavljevic, M. Momcilovic, D. Petrusko (2012) Influence of picosecond laser irradiation on nickel-based superalloy surface microstructure, Physica Scripta, T149, IOP Publishing, Temple Circus, Temple Way, Bristol, UK, 014079- 014083.
- [63] S.Petronic, A.G.Kovacevic, A.Milosavljevic, A. Sedmak (2012) Microstructural changes of Nimonic 263 superalloy caused by laser beam action, Physica Scripta, T150., 014080 – 014084, IOP Publishing, Temple Circus, Temple Way, Bristol, UK.
- [64] W.T.Hsiao, S.F.Tseng, K.C.Huang, Y.H.Wang, M.F.Chen (2011) Pulsed Nd:YAG laser treatment of monocrystalline silicon substrate, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 56 (1-4), 223-231.
- [65] J.P.Chu, J.M.Rigsbee, G.Banas, H.E.Elsayed-Ali (1999) Laser shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel, Materials Science and Engineering: A, 260 (1-2), 260–268.
- [66] P.Peyre, I.Chaieb, C.Braham (2007) FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 15, 205–221.
- [67] A.K.Pandey, A.K.Dubey (2013) Modelling and optimization of kerf taper and surface roughness in laser cutting of titanium alloy sheet, Journal of Mechanical Science and Technology, 27(7), 2115-2124.
- [68] D.Kondayya, A.G. Krishna (2013) An integrated evolutionary approach for modelling and optimization of laser beam cutting process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65(1-4), 259–274.
- [69] R.Rao, V.Yadava (2009) Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement, Optics & Laser Technology, 41, 922–930.
- [70] J.H.Jang, C.H.Lee, Y.U.Heo, D.H.Suh (2012) Stability of (Ti, M)C (M= Nb, V, Mo and W) Carbide in Steels using First-Principles Calculations, Acta Materialia, (60), 208 – 217.
- [71] P.Drobnjak, A.Kovačević, A.Milosavljević, Ž. Radovanović, I.Samardžić (2015) Nimonic 263 microstructure and surface characterization after laser shock peening, Metalurgija, 3, 551-554.
- [72] S. Petronić (2010) Uticaj termičke i laserske obrade na promene u mikrostrukтури superlegura nikla - doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [73] D.Bauerle (2003) Laser Processing and Chemistry; Springer Verlag: Berlin, Germany, p. 13–256.
- [74] C.Y.Chena, H.W.Yena, F.H. Kaoa, W.C. Li, C.Y. Huang, J.R.Yanga, S.H.Wang (2009) Precipitation hardening of high-strength low-alloy steels by nanometer-sized carbides, Materials Science and Engineering: A, (499), 162–166.

## ABSTRACT

### LASER TREATMENTS OF NIMONIC 263 NICKEL-BASED SUPERALLOY

*In this paper, the influence of parameters of laser processing (drilling, cutting, welding and laser shock peening) on microstructure of superalloy Nimonic 263 are investigated. Drilling and welding process are carried out on the Nd: YAG laser model LS-HTS Mobile P160. When drilling the holes, the parameters of pulse frequency (5 Hz, 7 Hz and 9 Hz) and the pulses duration (1.8 ms to 3.6 ms) are varied. The microstructure is investigated and geometrical and metallurgical characteristics of the holes are determined. Cutting is carried out on the laser BISTRONIC, (2000), BISTAR 3015. The parameters that were varied are as follows: the average laser power, laser velocity, the pressure of the assisting gas and the focus position. Based on the geometrical characteristics of the cuts and surface morphology the optimal parameters are discussed and defined. The laser welded joints of Nimonic 263, in addition to microscopic examination and surface profilometry, were subjected to the destructive testing. During the laser shock peening, the samples were exposed to laser light at a wavelength of 1064 nm and 532 nm, with the number of accumulated pulses 50, 100 and 200. The operating laser was Nd: YAG EKSPLO, SL212P model. Structural analysis of Nimonic 263 was carried out using light microscopy, scanning electron microscopy and EDS analysis. Microhardness measurements were carried out using the Vickers method under load of 9,81N. Profilometry was performed on a contactless profilometer Zygo Newview 7100.*

**Keywords:** laser treatment, Nimonic 263, EDS microhardness, profilometry.

*Review paper*

*Paper received: 15. 05. 2018.*

*Paper corrected: 10. 09. 2018.*

*Paper accepted: 15. 09. 2018.*

*Paper is available on the website: [www.idk.org.rs/journal](http://www.idk.org.rs/journal)*