



Sanja Petronić¹, Meri Burzić¹, Dubravka Milovanović², Katarina Čolić¹, Željko Radovanović³

Picosecond laser shock peening of base Nimonic 263 material and laser welded Nimonic 263 alloy

Mehanička obrada pikosekundnim laserom osnovnog materijala i zavarenih spojeva legure Nimonik 263

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.725

Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2015.

Ključne reči: zavarivanje laserom, obrada laserom, ispitivanje zatezanjem, mikrostruktura, superlegura Ni

Adresa autora / Author's address:

¹ Inovacioni centar Mainskog fakulteta u Beogradu, Beograd, Srbija

² Institut za nuklearne nauke "Vinča", Srbija

³ Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija

Key words: laser welding, laser treatment, tensile testing, microstructure, superalloy Ni

Abstract

Laser welding is a welding process with a high energy density and numerous advantages over conventional welding methods (narrow heat affected zone, lower heat input, less distortion, and the like.) Mechanical treatment laser is an innovative technique for improving the properties of fatigue resistance, abrasion and corrosion resistance. In this paper, mechanically processed by laser two groups of samples; base materials and laser welded joints. Sheets made of Ni superalloy 2mm thick -millisecond Nd: YAG laser, while the mechanical treatment made picosecond Nd: YAG laser. Welds are tensile tested, and microstructure was observed by optical and scanning electron microscopy. The microhardness was measured by Vickers method with a load of 10 N.

Izvod

Lasersko zavarivanje je proces zavarivanja sa velikom gustinom energije i mnogobrojnim prednostima u odnosu na konvencionalne metode zavarivanja (uska zona uticaja toplote, manji unos toplote, manja distorzija i sl.) Mehanička obrada laserom je inovativna tehnika kojom se poboljšavaju karakteristike otpornosti na zamor, habanje i otpornost na koroziju. U ovom radu, mehanički su obrađene laserom dve grupe uzoraka; osnovnog materijala i laserski zavarenih spojeva. Limovi superlegure debljine 2mm su zavareni milisekundnim Nd:YAG laserom, dok je mehanička obrada obavljena pikosekundnim Nd:YAG laserom. Zavareni spojevi su ispitani zatezanjem, a mikrostruktura je posmatrana optičkim i skenirajućim elektronskim mikroskopom. Mikrotvrdoća je merena po Vikersu sa opterećenjem od 10 N.

Uvod

Nimonik 263 je superlegura nikla, projektovana za rad na visokim pritiscima i temperaturama. Ova superlegura ima dobru otpornost na koroziju, optimalne termičke karakteristike, kombinovane sa dobrom duktilnošću, otpornosti na puzanje i na zamor, kao i na otpornost na habanje [1-3]. U praksi se često koristi kada se od zavarenih spojeva očekuje bolja duktilnost. Lasersko zavarivanje je zavarivanje visoke gustine energije. Zavarivanje laserom nudi mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne metode zavarivanja, a to su: visoka brzina zavarivanja, uska zona uticaja toplote, niska distorzija, jednostavnost

automatizacije, mogućnost zavarivanja debelih preska u jednom prolazu i poboljšanu fleksibilnost dizajna [4-8]. Jedna od mnogih karakteristika laserskog zavarivanja je sposobnost zavarivanja bez dodatnog materijala. Mehanička obrada laserom (laser shock peening) je, za razliku od laserskog zavarivanja, mehanička obrada bez topljenja materijala. Ovom obradom se poboljšavaju karakteristike zamora materijala, otpornost na interkristalnu koroziju, otpornost na habanje i oksidaciju, kao i mehaničke osobine materijala. Ako se mehanička obrada laserom uspešno primenjuje, performanse zamora metalnih



komponenti mogu da se znatno povećaju zahvaljujući prisustvu pritisnih zaostalih napona u materijalu [9-13]. Limovi superlegure Nimonic 263 su mehanički obrađeni pikosekundnim laserom, u dve grupe: prva grupa osnovni materijal, i druga grupa laserom zavareni spojevi. U ovom radu su limovi superlegure Nimonic 263, debljine 2 mm zavareni bez dodatnog materijala u dva prolaza. Limovi su zavareni Nd:YAG laserom koji ima

raznih prednosti u odnosu na CO₂ tipove lasera, kao što su visok stepen apsorpcije energije usled male refleksije, visoke brzine zavarivanja i drugo.

Eksperiment

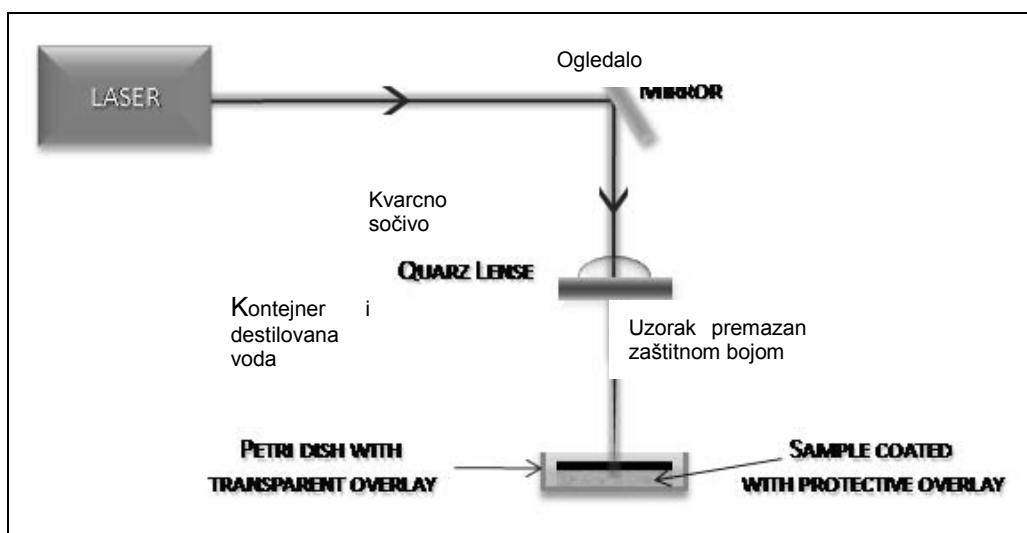
Uzorci superlegure Nimonic 263, pripremljeni u obliku limova dimenzija 10mm x 50 mm x 2mm, polirani su i očišćeni etanolom. Hemijski sastav Nimonic 263 je naveden u Tabeli 1.

Element	C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Ti	Ni
%	0.06	0.3	0.5	0.5	20	20	0.1	0.5	5.9	2.2	49.94

Tabela 1. Hemijski sastav superlegure Nimonic 263

Eksperiment se sastojao iz dva dela: u prvom delu osnovni materijal superlegure Nimonic 263 je mehanički obrađen pikosekundnim laserom, a drugom delu su laserski zavareni spojevi mehanički obrađeni pikosekundnim laserom.

U oba dela eksperimenta uzorci su premazani crnom bojom (zaštitnim slojem) i uronjeni u destilovanu vodu, koja je služila kao transparentni sloj. Laserski zrak je vođen sistemom ogledala i fokusiran ispod površine uzorka, pod upadnim uglom od 90 stepeni. Šema eksperimenta za LSP obradu Nimonic 263 uzoraka prikazana je na slici 1.



Slika 1. Šema eksperimenta za mehaničku obradu laserom superlegure Nimonic 263.

Uzorci osnovnog materijala su laserski obrađeni sledećim parametrima procesa: trajanje impulsa 170 ps, talasna dužina impulsa 1064 nm i broj impulsa od 50,100 i 200. Tip lasera je Nd: YAG EKSPLO, model SL212P. Energija impulsa je varirala od 2 mJ do 15 mJ i odgovarajuća gustina energije se kretala od 0,1 do 0,3 J/cm². Dobijene površinske promene su proučavane skenirajućim elektronskim mikroskopom, SEM Model JEOL JSM-5800. Merjenja mikrotvrdoće su obavljena po Vickersu pomoću poluautomatskog aparata - Hauser 249A i pod opterećenjem od 10 N. Takođe, morfologija promene površine je analizirana beskontaktnim profilometrom ZIGO NevView 7100.

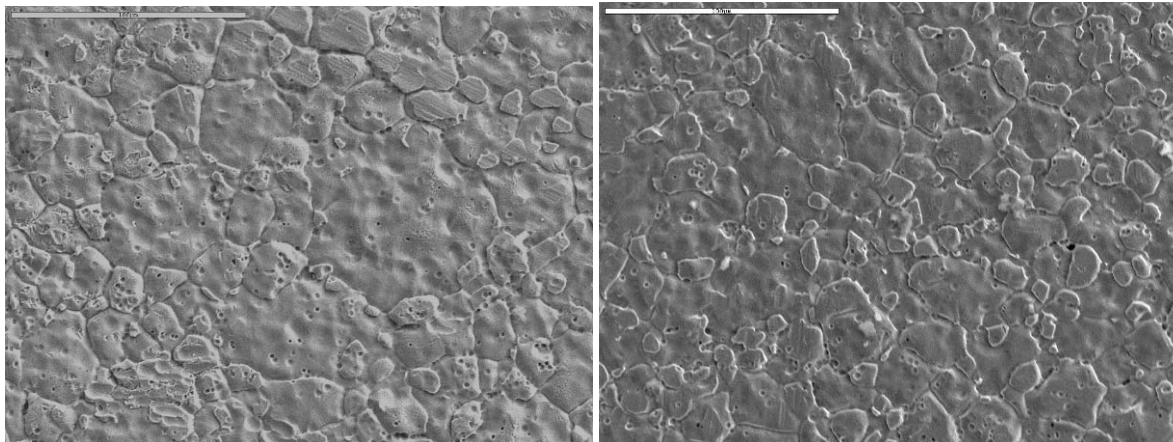
Uzorci superlegure Nimonic 263 su zavareni Nd: YAG parametrima: energija lasera 250 A, trajanjem impulsa od 8,0 ms, veličina spota od 1,0 mm, i frekvencija impulsa od 4,0 Hz. Zavareni spojevi su podvrgnuti mehaničkoj obradi pikosekundnim gore navedenim laserom sa sledećim karakteristikama: talasna dužina 1064 nm, trajanje impulsa 170 PS, režim oko TEM₀₀, frekvencija 10Hz. Energija impulsa je 2 - 15 mJ. Ispitivanjem zatezanjem su određene zatezne karakteristike uzoraka a ispitivanja su obavljena na mašini Shimadzu kapaciteta 250 kN. Uzorci su snimani na SEM i analizirani energo-disperzoionom spektrometrijom.



Rezultati i diskusija

Mikrostruktura osnovnog materijala superlegure Nimonik 263 je prikazana na slici 2. Mikrostrukturu karakterišu veličina zrna $F_m = 232.45 \mu\text{m}^2$, slika 2,

[14]. Mera površine odstupanja devijacije površine je odnos gornjeg i donjeg vrha (peak to valley – PV odnos) i iznosi $48,5 \mu\text{m}$ za osnovni materijal superlegure Nimonik 263.



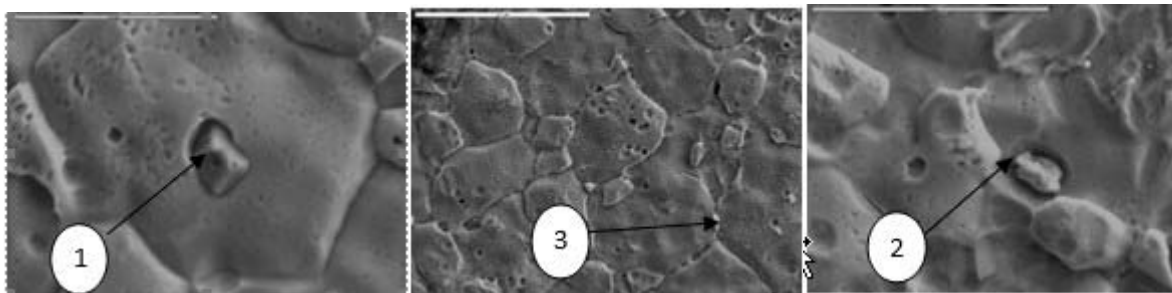
Slika 2. a) Mikrostruktura superlegure Nimonik 263. SEM ; b) posle mehaničke obrade laserom (energija impulse od 10 mJ ($F = 0.2 \text{ J cm}^{-2}$) i talasna dužina od 1064 nm.

Interakcija pikosekundog laserskog impulsa sa metalima je složen proces, [15], jer se radi o nekoliko fizičkih procesa i zavisi od parametara lasera (talasne dužine, trajanje impulsa, energije itd) i površinskog stanja uzorka (hrapavost, koeficijent apsorpcije itd). Baziran na ovom ograničenom ablacionom modu proces mehaničke obrade laserom se može opisati u dvostepenoj sekvenci: 1) brza ekspanzija plazme stvara iznenadni jednoosni pritisak na ozračenu površinu i dilataciju površinskog sloja, 2) okolni materijal reaguje na deformisane površine stvarajući polje pritisnih napona [13,16].

Udarni talasi izazivaju promene u mikrostrukturi blizu površine i uzrokuju formiranje dislokacija velike gustine. Kombinovani efekat mikrostrukturnih promena i nagomilavanja dislokacija doprinosi povećanju mehaničkih osobina blizu površine. LSP poboljšava zamor, koroziju i otpornost metala kroz mehaničke efekte od udarnih talasa.

Slika 2b). predstavlja mikrostrukturu nakon procesa mehaničke obrade pikosekundnim laserom na 1064 nm talasne dužine, impulsa energije od 10 mJ i broja impulsa 100. Kada se povećava broj akumuliranih impulsa mikrostruktura postaje finija, ali nakon 200 impulsa dolazi do delimičnog topljenje materijala pojavljuje i mikrostruktura postaje staklasta. Povećanjem energije impulsa smanjuje se veličina zrna. Najfinija struktura se dobija pri energiji impulsa od 10 mJ, mada su i pri ovoj energiji primetne pore. Pri većim energijama impulsa veći je broj pora.

Promene u mikrostrukturi, izazvane mehaničkom obradom laserom, su tipične za ovu superleguru i odražavaju se formiranjem karbida - TiC, CrC i (Ti, Mo) C, koji se odvajaju na zrnima i na granicama zrna. Titan monokarbid (TiC) je veoma tvrd, stabilan i na visokim i na niskim temperaturama. (Ti Mo) V je karakteristična strukturna komponenta koja prilično utiče na mehaničke i fizičke osobine materijala [17]. Slika 3a) – c) prikazuje faze nastale tokom pikosekundog LSP sa parametrima procesa: talasna dužina 1064 nm, 10 mJ energija laserskog zraka i broj impulsa 100 (Slika 3a i b). Tabela 2 prikazuje rezultate EDS analize mikrokonstituenta označenih na slici 3a) – c). Ovi rezultati sugerišu formiranje raznih faza, kako željenih, tako i neželjenih - u zavisnosti od njihove morfologije, veličine i mesta pojavljivanja. Prema EDS rezultatima spektruma 1, kao i morfologije ovih faza - prilično regularna piramida, može se pretpostaviti da je to Ti karbid. Veličina i mesto formiranja sugerišu da je karbid u Spektrum 1 j neželjena faza koja lako može da izazove stvaranje prslina. Faza prikazana u spektrumu 2. je, prema EDS rezultatima, verovatno TiMo karbid. Ove vrste jedinjenja se odlikuju nepravilnim oblicima i mikrometarskim redom veličine zrna. U tom slučaju, prisustvo TiMo karbida je nepoželjno jer može da izazove stvaranje prslina u materijalu. Na slici 3c) prikazani su mikrokonstituenti čija je elementarna analiza data u tabeli 2 (spektrum 3). Po morfologiji, mestu nastanka i veličini, kao i prema EDS rezultatima smatra se da su ovo Ti karbidi i u ovom slučaju se smatraju povoljnim.



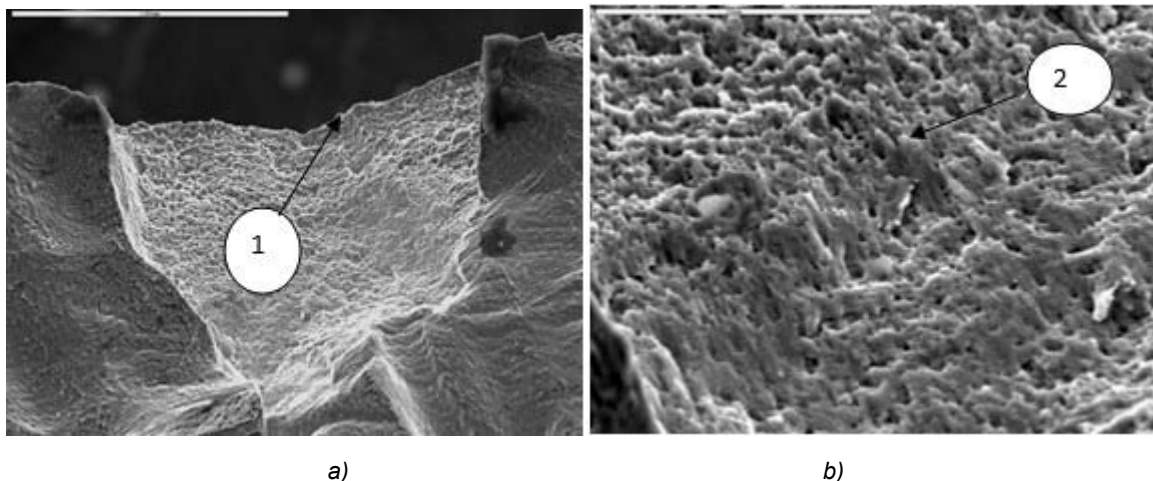
Slika 3. Mikrokonstituenti formirani tokom mehaničke obrade laserom sledećim parametrima: talasna dužina 1064 nm, energija impulsa od 10 mJ, i brojevi impulsa a) 100, b) 100p, c) 50p

Spec	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Spec 1	11.79	0.11	0.15	49.87	6.96	0.20	0.19	7.41	18.79	4.52
Spec 2	14.56	0.13	0.19	13.36	11.56	1.00	0.33	13.22	34.04	12.19
Spec 3	9.76	0.12	0.15	24.56	13.96	0.5	0.2	15.23	30.92	4.92

Tabela 2. Rezultati EDS analize u tačkama 1, 2 i 3 na slici 3.

U ovom radu, lasersko zavarivanje Nimonic 263 limova je izvršeno različitim parametrima. Parametri koji su obezbedili zavarene spojeve bez grešaka su određeni radiografskim snimanjem. Nakon zavarivanja primenjena je mehanička obrada laserom u cilju dodatnog poboljšanja mehaničkih svojstva i morfologije površine. Slike 4a) i 4b) pokazuju mikrostrukture loma zavarenog spoja Nimonic 263 superlegure nakon ispitivanja zatezanjem. Kao što se očekivalo, svi uzorci su polomljeni u šavu metala zbog činjenice da je zavarivanje izvršeno bez dodatnog materijala. 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 interdendritnim oblastima. Vizuelnom observacijom mikrofografija, uočava se da je površina preloma dosta ravnomerna sa

jamicama veličine do 2 μm . Jamice ukazuju na izvesnu duktilnost zavarenog spoja. Na prelomu se ne vidi preferencijalni put loma, a mogu se i jasno uočiti manje čestice. Rupičasti prelom ne ukazuje na postojanje zazora. U tabeli 3 navedeni su rezultati energodisperzivne spektrometrije u mestima označenim na slikama 4a) i 4b). Rezultati pokazuju povećan sadržaj Al. Veličina i morfologija sugerišu formiranje Al oksida. Postojanje ovih čestica na površini loma sugerišu da su mikro šupljine počele na granici čestica/matrice. Rezultati testova zatezne čvrstoće pokazuju da su se prelomi dogodili u zavarenim šavovima. Zatezna čvrstoća je 432 MPa, što je oko 85% od vrednosti zatezne čvrstoće osnovnog materijala. Razlog za to može se naći u različitim morfologijama spajanja tokom procesa zavarivanja laserom [18] i formiranja čestica primećenih u mikroporama.



Slika 4. Mikrostrukture prelomnih površina zavarenog spoja Nimonic 263 legure.

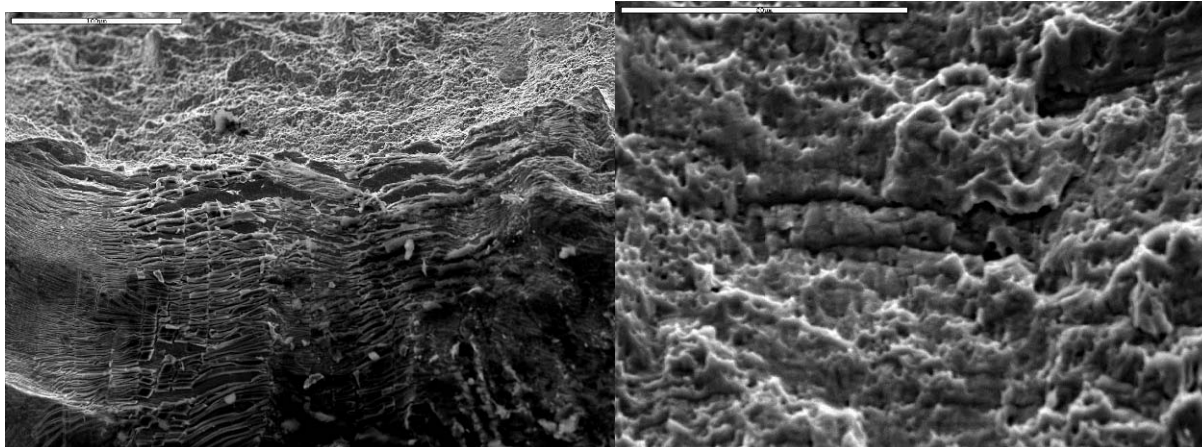


Spect	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Spec1	15.9	0.77	1.93	14.02	0.6	0.42	18.52	42.35	4.52
Spec 2	5.71	0.79	2.38	17.13	0.52	0.33	18.95	47.15	6.31

Tabela 3. Rezultati EDS analize u tačkama 1 i 2 na slikama 4a) i 4b)

Slika 5a) prikazuje površinu preloma zavarenih spojeva podvrgnutih tretmanu mehaničke laserske obrade posle zavarivanja. Površina loma je manje uniformna od površine loma netretiranog zavarenog spoja. Postoje jamice koje ukazuju na duktilnost loma, ali je njihov oblik više elipsoidan. Njihova veličina je do 7 μm . To je u skladu sa rezultatima ispitivanja zatezanjem- zatezna čvrstoća uzorka mehanički tretiranog laserom je 442MPa - vrlo slično netretiranom uzorku, ali je izduženje kod mehanički tretiranog uzorka oko tri puta veće nego izduženje kod netretiranog uzorka. Slika 5b) prikazuje prednju stranu zavarenog spoja

naknadno mehanički obrađenu laserom. Može da se primeti da je posle ispitivanja zatezanjem u prvom sloju, nastalom tokom mehaničke obrade laserom, došlo do usitnjavanja i raspadanja prvog sloja na sitne pločice. Pločice su veoma slične po obliku i geometriji, kao i veličini. Veličina ovih lamela je do 10 μm . U tabeli 4 prikazani su rezultati celog područja predstavljenog na slici 5b). Povećani sadržaj Al i Ti ukazuju na formiranje različitih faza. Prema veličini i obliku, i rezultatima u tabeli 4. pretpostavlja se da je došlo do formiranja Ti karbida i Al-oksida.



Slika 5. a) Mikrostruktura prelomne površine naknadno mehanički obrađenog zavarenog spoja Nimonic 263 legure; b) mikrostruktura prednje strane površine naknadno mehanički obrađenog zavarenog spoja Nimonic 263 legure

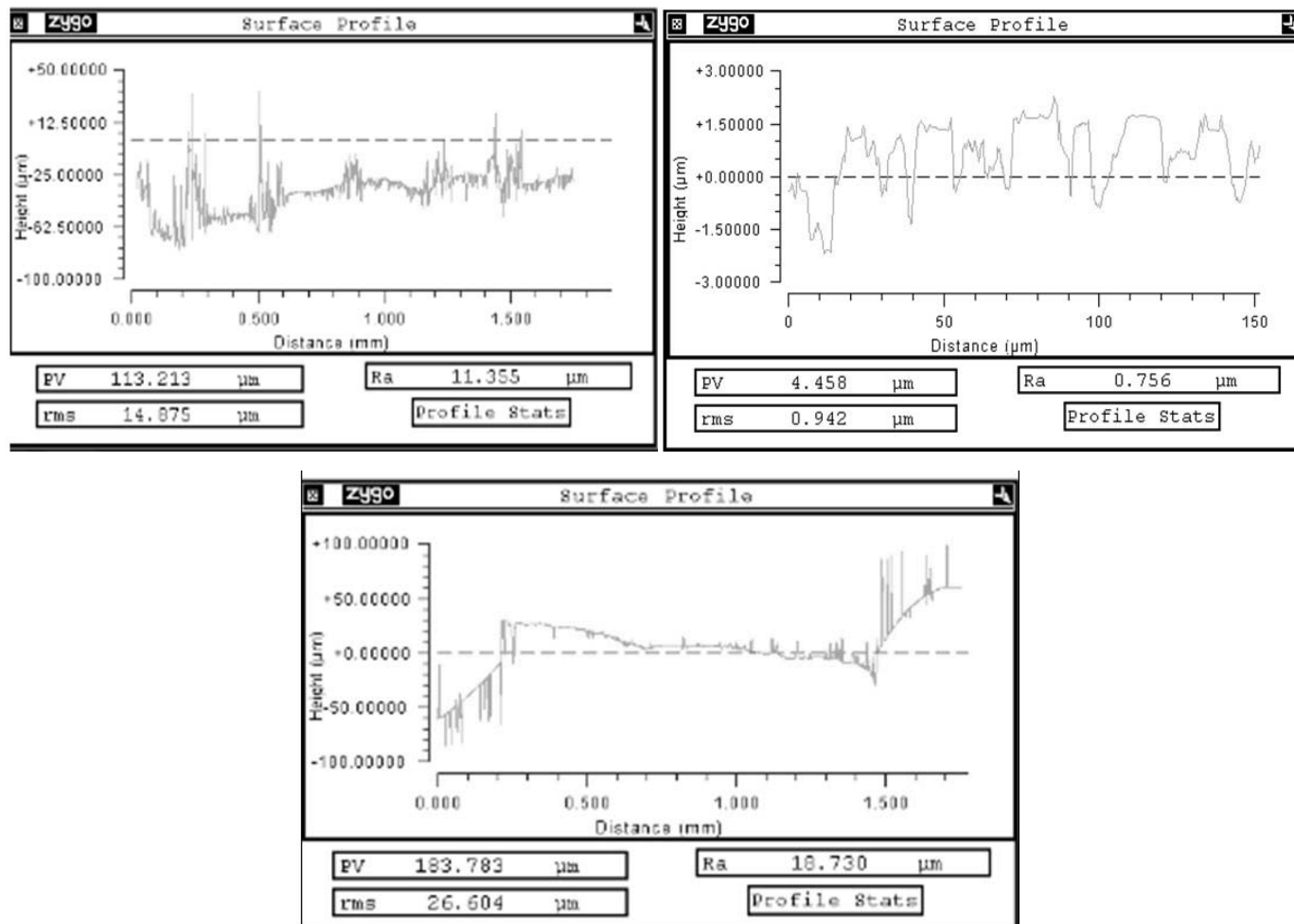
Spect	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Slika 5b)	6.2	0.35	9.52	16.94	0.6	0.48	18.23	412.33	5.72

Tabela 4. Rezultati eds analize površine prikazane na slici 5b)

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 prsline uvek nastaju na slobodnim površinama. Visoka površinska hrapavost stvara koncentraciju lokalnih napona i ubrzava stvaranje prsline. Kod primene materijala za delove gde se traži otpornost na habanje neophodno je ukloniti hrapavu površinu [18]

Na slikama 6a), 6b) i 6c) prikazani su dvodimenzionalni profili površina posle a) mehaničke obrade laserom osnovnog materijala, b) posle zavarivanja laserom i c) posle mehaničke

obrade laserom laserski zavarenog spoja. Analizom slike 6a) dolazi se do zaključka da je mehanička obrada laserom smanjila odnos gornjeg i donjeg vrha (PV odnos) čak 10 puta. Takođe, srednja hrapavost je umanjena dva puta. Rezultati na slikama 6b) i 6c) pokazuju da PV odnos je 374,15 μm , i srednja hrapavost je 31,3 μm , zavarenog spoja bez naknadne obrade. Rezultati izmereni na zavarenom spoju naknadno mehanički obrađenog laserom pokazuju da PV odnos je 316,15 μm , koren srednje kvadratne (RMS) je 32,58 μm i prosečna hrapavost je 29,15 μm . Može se primetiti da je naknadna mehanička obrada laserom zavarenih spojeva izazvala relativno homogenu modifikaciju površine u celoj oblasti interakcije.



Slika 6. Dvodimenzionalni profili: a) LSP osnovnog materijala, b) zavarenog spoja c) LSP zavarenog spoja.

Mikrotvrdoća je merena po Vickersu, pod opterećenjem od 10 N za vreme utiskivanja od 10 sec. Mikrotvrdoća osnovnog materijala je iznosila 238,1 HV1, dok je mikrotvrdoća laserom mehanički obrađenog osnovnog materijala iznosila 260 HV1. Nakon laserskog zavarivanja mikrotvrdoća je povećana, tako da je u zoni uticaja toplote izmerena vrednost 248 HV1, dok je u zavarenom spoju vrednost 258 HV1. Mehanička obrada laserom povećava mikrotvrdoću površine osnovnog materijala. Međutim, kod laserom zavarenih spojeva, mehanička obrada povećava mikrotvrdoću u samom šavu dok u zoni uticaja toplote nema bitnih promena i uticaja.

Zaključak

Mehanička obrada laserom poboljšava kvalitet površina, povećava mikrotvrdoću i izaziva povoljne mikrostrukture transformacije, koje teoretski ukazuju na moguća poboljšanja mehaničkih karakteristika i zamor. Usled mehaničke obrade laserom dolazi do mikrostrukturnih promena i stvaraju se poželjne i nepoželjne faze.

Zavarivanje laserom je dalo zadovoljavajuće rezultate u pogledu mehaničkih osobina s obzirom da je zavarivanje rađeno bez dodatnog materijala. Prelomne površine su uniformne, jamičaste što ukazuje na duktilnost zavarenog spoja.

Mehaničkom obradom zavarenog spoja smanjena je hrapavost i odnos gornjih i donjih pikova. Povećana je mikrotvrdoća i osnovnog materijala i zavarenog spoja. Nakon mehaničke obrade zavarenog spoja izdvojio se sloj po površini koji se prilikom ispitivanja zatezanjem raspapčao u pločice pravilnih oblika.

Zahvalnost

Rad je proizašao iz projekata ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj TR35460, TR35024 i ON 172019.



Literatura

- [1] Murthy, G.V.S., Ghosh, S., Das, M., Das, G., Ghosh, R.N.: Correlation between ultrasonic velocity and indentation-based mechanical properties with microstructure in Nimonic 263, *Material Science and Technology: A* 488 (1-2), (2008), 398-405.
- [2] Pollock, M.T., Tin, S.: Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties, *Journal of Propulsion and Power*, 22 (2), (2006), 361-374.
- [3] Petronic, S., Kovacevic, A.G., Milosavljevic, A., Sedmak, A.: Microstructural changes of Nimonic 263 superalloy caused by laser beam action. *Physica Scripta*, T150, (2012), 014080 – 014084.
- [4] Liu, X.B., Yu, G., Pang, M., Fan, J.W., Wang, H.H., Zheng, C.Y.: Dissimilar autogenous full penetration welding of superalloy K418 and 42CrMo steel by a high power CW Nd:YAG laser, *Applied Surface Science* 253, (2007), 7281–7289.
- [5] Jeon, M., Lee, J.H., Woo, T.K., Kim, S.: Effect of Welding and Post-weld Heat Treatment on Tensile Properties of Nimonic 263 at Room and Elevated Temperatures, *Metallurgical and materials transactions A*, 42A, (2011), 974-985.
- [6] Odabasi, A., Unlu, N., Goller, G., Kayali, E.S., Eruslu, M.N.: 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, (2013), 731–741.
- [7] Guo, W., Dong, S., Guo, W., Francis, J.A., Li, L.: Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel, *Materials Science and Engineering A*, 625, (2015), 65-80.
- [8] Buckson, R.A., Ojo, O.A.: 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*, 25, 2014,
- [9] Clauer, A.H., Holbrook, J.H., Fairand, B.P.: Effects of laser induced shock waves, In: M.A. Meyers, L.E. Murr (ed), *Shock Waves and High-strain, Phenomena in Metals*, Plenum Press, New York, (1998), 675–703.
- [10] Petronic, S., Milovanovic, D., Milosavljevic, A., Momcilovic, M., Petrusko, D.: Influence of picosecond laser irradiation on nickel-based superalloy surface microstructure, *Physica Scripta*, T149, (2012), 014079- 014083.
- [11] Hong, Z., Chengye, Y.: Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A* 257, (1998), 322–327.
- [12] Yilbas, B.S., Shuja, S.Z., Arif, A., Gondal, M.A.: Laser-shock processing of steel, *J Mater Proc Technol*, 135, (1), (2003), 6-17.
- [13] Peyre, P., Fabbro, R.: Laser shock processing: a review of the physics and applications, *Opt. Quant. Electr.* 27 (12), 1995.
- [14] Schumann, H.: *Metallographie*, Leipzig: Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, (in German), (1974),
- [15] Bauerle, D.: *Laser Processing and Chemistry*, Springer Verlag, Berlin, (2003). 13-256.
- [16] Devaux, D., Fabbro, R., Tollier, L., Bartnicki, E.: Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry, *J. Appl. Phys.* 74 (4), (2012), 2268-2273.
- [17] Jang, J. H., Lee, C.H., Heo, Y.U., Suh, D.H.: Stability of (Ti,M)C (M=Nb, V, Mo and W) Carbide in Steels using First-Principles Calculations, *Acta Materialia* 60, (2012), 208-217.
- [18] Sahaya Grinspan, A., Gnanamoorthy, R.: Surface modification by oil jet peening in Al alloys, AA6063-T6 and AA6061-T4 Part 2: Surface morphology, erosion, and mass loss. *Applied Surface Science*, 253, (2), (2006), 997-1005.