

SELEKTYVIOJU LAZERINIO SUKEPINIMO BŪDU SUKEPINTŲ GELEŽIES PAGRINDO MILTELIŲ PAVIRŠIAUS LAZERINIO MIKROAPDIRBIMO TYRIMAI

Gerda VAITKŪNAITĖ¹, Vladislav MARKOVIČ², Olegas ČERNAŠĖJUS³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹gerda.vaitkunaite@stud.vgtu.lt; ²vladislav.markovic@vgtu.dok.lt; ³olegas.cernasejus@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas selektyvioju lazerinio sukepinimo (SLS) būdu pagamintų plieno 1.2083 bandinių mikroapdirbimas lazerio pluoštu. Tyrimo metu įvertinta sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių poveikio zonos forma ir dydis bei temperatūros pasiskirstymas paviršiniame sluoksnyje. Eksperimentinių bandymų metu nustatyta lazerinio mikroapdirbimo technologinių parametų įtaka apdoroto bandinio poveikio zonos pločiui ir kietumui. Buvo atlikta bandinių lazerio pluoštu paveiktų ir neapdorotų medžiagos zonų mikrostruktūros analizė.

Reikšminiai žodžiai: selektyviojo lazerinio sukepinimo technologija, mikroapdirbimas lazeriu, skaitinis modeliavimas, mechaninės savybės, mikrostruktūros analizė.

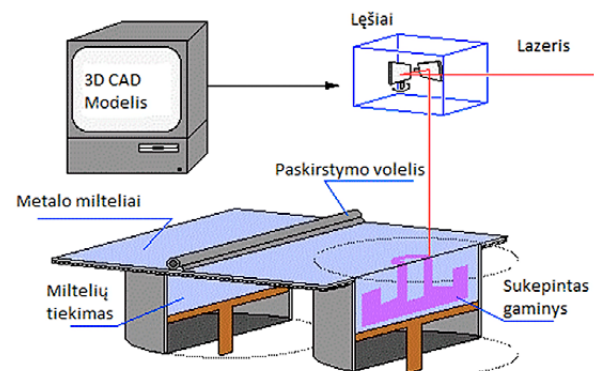
Įvadas

Augant gamybos poreikiams ir reikalavimams, alternatyvūs gamybos būdai sulaukia daugiau dėmesio. Šiuolaikinėje gamyboje didelę įtaką inovacijų procesams turi galimybė greitai ir kokybiškai pagaminti produkto prototipą, su kuriuo atlikus bandymus ir tyrimus galima plėtoti tolesnę produkto raidą. Siekiant pagaminti prototipą kuo mažiau eikvojant išteklius, sunaudojant minimalų medžiagų, laiko ir žmogiškųjų išteklių kiekį, dvidešimto amžiaus 8-ajame dešimtmetyje Amerikoje buvo išrastas polimerų miltelių sukepinimo įrenginys, kuris iki šių dienų išsiplėtojo į savarankiškas 3D spausdinimo ir lazerinio sukepinimo technologijas.

Lazerinėms sukepinimo technologijoms (SLS – *selective laser sintering*) plačiai naudojamos polimerinės medžiagos – polikarbonatas, polivinilo chloridas, ABS, nailonas, polisteris, polipropanas, poliuretanai. Tačiau tobulėjant SLS technologijoms, sukepinti gaminiai gali būti naudojami ne tik kaip prototipai, bet ir kaip funkcionuojančio mechanizmo dalys. Dažniausiai tokiems, geromis technologinėmis ir mechaninėmis savybėmis pasižymintiems, gaminiams sukepinti naudojami įvairūs metalo pagrindo milteliai: nerūdijančiojo plieno, martensitinio plieno, titano (Das *et al.* 1999), chromo, geležies (Liu *et al.* 2007) bei aliuminio (Loh *et al.* 2014). Taikant lazerinio sukepinimo būdą naudojami metalai ir jų lydiniai, galintys suteikti sukepintam gaminiui būtinas eksploatacines ir funkcines savybes.

SLS technologija

SLS procesas pradedamas nuo 3D modelio kūrimo CAD programine įranga. Tam, kad objektas būtų pagamintas, programinė įranga suskaido 3D objekto tūrį į skerspjūvius, kurie proceso metu naudojami kaip lazerinio sukepinimo sluoksniai. Tuomet paruošta komandinė STL rinkmena yra perduodama SLS sukepinimo aparatui, kurį sudaro CO₂ lazeris ir metalo miltelių tiekimo sistema (1 pav.).

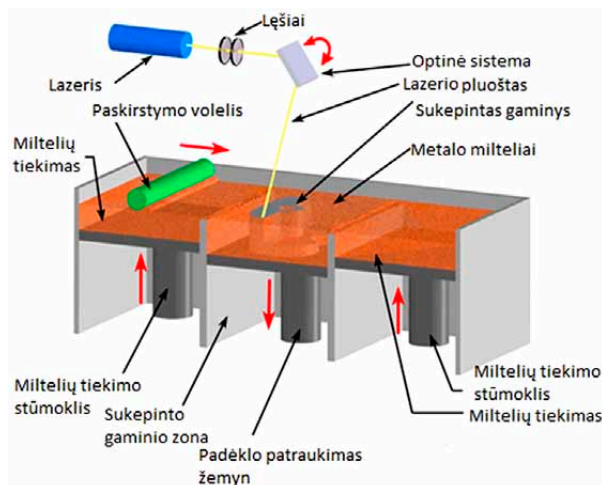


1 pav. SLS technologijos sistemos konfigūracija

Fig. 1. The configuration of the system for SLS technology

Metalo milteliai tolygiai paskirstomi vienodu storių gaminio formavimo zonos paviršiuje ir įkaitinami iki temperatūros, šiek tiek žemesnės nei lydymosi temperatūra.

Pagal 3D modelio skerspjūvio kontūrą nustatoma gaminio formavimo zona, veikiama koncentruotu lazerio energijos srautu. Lazeris įkaitina miltelius iki lydymosi temperatūros, todėl milteliai gali sudaryti vientisą sluoksnį. Kai sluoksnis yra sulydomas, gaminio formavimo platforma nuleidžiama žemyn specialiu padėklu. Miltelių paskirstymo volelis tolygiai paskirsto naujus miltelius ant sukepinto sluoksnio paviršiaus. Naujas miltelių sluoksnis taip pat sukepinamas lazeriu. Sluoksnių sukepinimo procesas ir naujų miltelių paskirstymas kartojamas, kol sukuriamas visas objektas (2 pav.).



2 pav. SLS proceso schema
Fig. 2 Scheme for the SLS process

Ši technologija jau keletą dešimtmečių nagrinėjama tyrėjų ir gamybininkų, siekiant tobulinti prototipų gamybą ir kurti naujus mechanškai patvarius įrenginius. Atrandama vis naujų lazerinio sukepinimo technologijų pritaikymų: biomechanikos, dizaino, architektūros, mados industrijos, automobilių gamybos, įrankių ir šampų kūrimo, elektronikos ir robotikos srityse.

SLS technologijų aktualumas

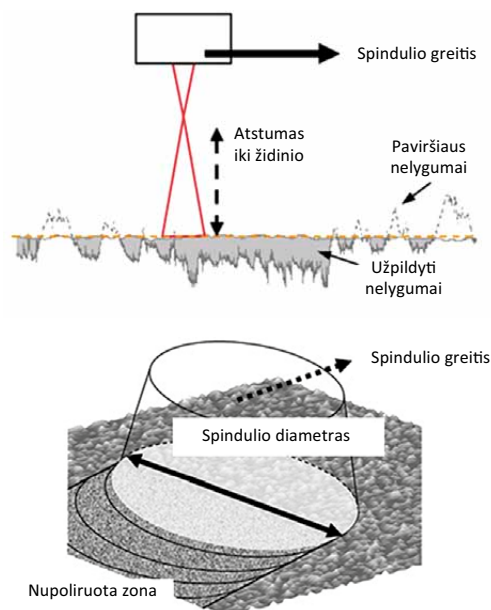
SLS būdu sukepinti gaminiai pasižymi dideliu paviršiaus šiurkštumu, porėtumu, neturi tokių gerų mechaninių savybių, kaip lietas metalas. Norint sumažinti šios technologijos trūkumus, pasaulyje yra atliekama daug mokslinių tyrimų. Tiriami SLS proceso šilumos mainai ir temperatūrų pasiskirstymas metalo miltelių sluoksniuose sukepinant (Yin *et al.* 2012), sukeptintų geležies miltelių sluoksnių terminis nuovargis (Wang *et al.* 2009), proceso energijos pokyčių analizė ir optimizavimas (Ratnadeep, Anand 2012), sukeptintų metalo miltelių atsparumas trinčiai (Maeda, Childs 2004), paviršiaus mikroapdirbimas ir atsparumas korozijai (Rossi *et al.* 2004).

Tam, kad SLS būdu sukepinti gaminiai turėtų mažesnę šiurkštumą, porėtumą, didesnę atsparumą korozijai, geresnes tribologines ir mechanines savybes, būtinas tolesnis sukepinto gaminio paviršiaus apdirbimas.

Apdirbimo metodai klasifikuojami pagal poveikio būdą medžiagos atžvilgiu: išskiriami medžiagos sluoksnio šalinimo būdai ir medžiagos paviršinio sluoksnio formavimo būdai. Medžiagos šalinimo būdai: mechaninis (frezavimas ir t. t), abrazyvinis (šlifavimas ir t. t), elektroerozinis (elektrokibirkštinis ir t. t), elektrocheminis (ėsdinimas, poliravimas ir t. t). Paviršinio sluoksnio formavimo būdai: padengimas (galvanastėginis ir t. t), perlydymas (mikroapdirbimas lazeriu ir t. t), modifikavimas (aktyviojoje dujinėje terpėje ir t. t). Vienas iš perspektyviausių SLS sukeptintų gaminių apdirbimo būdų yra mikroapdirbimas lazeriu, kuris pasižymi lengvu proceso valdymu, dideliu našumu ir efektyvumu.

Paviršiaus mikroapdirbimas lazeriu

Mikroapdirbimas lazeriu gali būti trijų tipų: abliacija didelėje zonoje, abliacija mažoje zonoje arba perlydant. Galutiniam paviršiaus mikroapdirbimui (poliravimas lazeriu) perlydant sukeptintą sluoksnį gali būti naudojamas impulsinis lazeris, išskiriantis energiją impulsais, kurių trukmė 20–1000 ns (Wissenbach 2011). Lazerinio poliravimo metu plonas paviršiaus sluoksnis perlydomas lazeriu. Lazerio energijos tankis turi būti pakankamas tam, kad perlydytų paviršiaus nelygumus, bet nepasiektų gilesnių gaminio sluoksnių (3 pav).



3 pav. Lazerinio poliravimo schema
Fig. 3 Scheme for laser polishing

Paviršiaus mikroapdirbimas lazeriu yra automatizuotas procesas, kuris greitesnis nei mechaninis apdirbimas. Jo metu neišskiriami cheminių reakcijų produktai. Kadangi lazerio energijos parametrus ir gaminio terminio poveikio zoną galima optimizuoti ir reguliuoti, o aukštą temperatūros poveikį patiria tik konkreti gaminio paviršiaus zona, todėl lazerinio poliravimo metu gaminio matmenys ir technologinės savybės nekinta.

Lazerinio mikroapdirbimo parametrai

Sukepintų gaminių galutinio lazerinio mikroapdirbimo metu svarbiausi parametrai, nulemiantys lazerinį poliravimo procesą, yra metalo miltelių, iš kurių sukepintas gaminytis, savybės ir sudėtis, paviršiaus šiurkštumas bei lazerio energijos tankis, kuris apskaičiuojamas pagal lazerio galios, greičio ir spindulio skersmens santykį. Remiantis A. Lamikiz atliktais tyrimais, nustatyta, kad sukepinus 60 % nerūdijančiojo plieno miltelių (cheminė sudėtis C < 0,15 %, Cr 12,0–14,0 %, Mn < 1,0 %, Si < 1,0 %) ir 40 % bronzos miltelių, gaminio paviršiaus šiurkštumas yra 7,5 μm. Tačiau galutinio mikroapdirbimo metu parinkus lazerio energijos tankį 0,4–0,45 W/m², paviršiaus šiurkštumas sumažėjo iki 1,49 μm. Šiais tyrimais nustatyta, kad taikant lazerinį poliravimą paviršiaus šiurkštumą galima sumažinti apie 80 % (Lamikiz *et al.* 2007). Tačiau lazerinio poliravimo būdu galima pasiekti paviršiaus šiurkštumą, mažesnę negu 1 μm. T. M. Shao atlikti tyrimai parodė, kad iš nerūdijančiojo plieno miltelių sukepinto gaminio (cheminė sudėtis C < 0,08 %, Cr 17,5–20 %, Ni 8–11 %, Mn < 2 %) paviršiaus šiurkštumas mažinamas nuo 0,14 μm iki 99,5 nm, parinkus tokius lazerio parametrus: energijos impulso trukmė 30 ns ir pulso energija 1015 MJ, spindulio skersmuo 0,2 mm ir greitis 2 mm/min (Shao *et al.* 2005).

Tyrimų objektas

SLS tyrimams buvo naudojami nerūdijančiojo plieno milteliai 1.2083 (cheminė sudėtis C < 0,35–0,44 %, Cr 12–14 %, Si iki 0,6 %, Ni iki 0,6 %, Mn iki 0,6 %). Sukepinimas atliktas naudojant *Concept laser 3M* įrenginį, parinkus režimus remiantis gamintojo rekomendacijomis.

Mikroapdirbimas atliktas lazeriu *Puls power 150 Speed cpc*. Paviršiaus sluoksnis buvo veikiamas lazeriu, kurio galia buvo keičiama nuo 0,5 iki 1,5 kW, impulso generacijos dažnis nuo 5 iki 15 Hz, lazerio poveikio laikas nuo 3 iki 9 s, esant 150 mm atstumui iki bandinio ir 6 ms impulso trukmei.

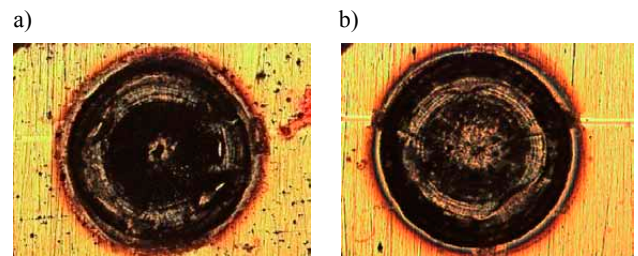
Sukepintų ir apdorotų bandinių mikrostruktūra ir poveikio zonos plotis buvo tiriami, taikant optinę mikrosko-

piją. Tyrimui panaudotas mikroskopas *Nikon MA 200* ir vaizdo kamera *LUMENERA 3Mp*. Vaizdai apdoroti taikant vaizdo analizavimo programą *Scion Image*. Lazeriu apdorotų bandinių paviršiaus mikrokietumo reikšmės buvo nustatomos mikrokietmačiu *Zwick/Roell ZHμ*.

Siekiant įvertinti temperatūros ir įtempių pasiskirstymą lazerinio mikroapdirbimo metu buvo taikomas skaitinis baigtinių elementų metodas – modeliavimas *ANSYS* programa.

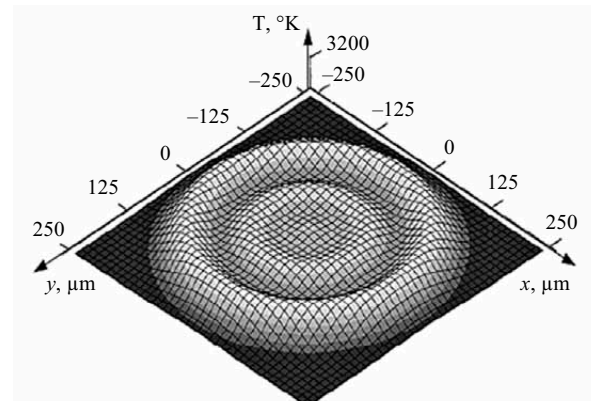
Tyrimų rezultatai

Taikant optinę mikroskopiją, buvo nustatyta, kad lazerinio mikroapdirbimo metu sukepinto bandinio paviršiuje formuojasi kelios poveikio zonos: centrinė sritis ir dvi ryškios žiedo formos zonos (4 pav.). Todėl modeliuojant šilumos mainų procesus, vykstančius veikiant lazeriui, buvo naudojamas kombinuotas šilumos šaltinis, kurį sudaro trys atskiros sekcijos (5 pav.).



4 pav. Lazerio pluoštu apdorotas plotas: a – lazerio impulso trukmė 6 ms, impulsų generacijos dažnis 10 Hz, lazerio pluošto galia 1 kW, poveikio laikas 3 s, padidinimas mikroskopu 30 kartų; b – lazerio impulso trukmė 6 ms, impulsų generacijos dažnis 10 Hz, lazerio pluošto galia 1,5 kW, poveikio laikas 3 s, padidinimas mikroskopu 25 kartus

Fig. 4. Laser treated surface: a – laser pulse duration of 6 ms, pulse generation under the frequency of 10 Hz, laser power of 1 kW, treatment time of 3 s, x30; b – laser pulse duration of 6 ms, pulse generation under the frequency of 10 Hz, laser power of 1,5 kW, treatment time of 3 s, magnification 25

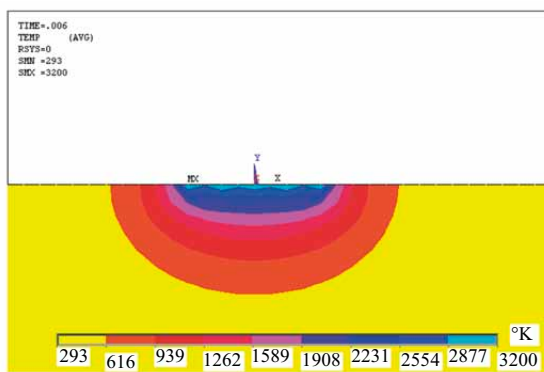


5 pav. Lazerinio mikroapdirbimo skaitinio modeliavimo šilumos šaltinis

Fig. 5. Heat source of numerical modeling of laser micro polishing

Visų šaltinių intensyvumas pasiskirsto pagal Gauso dėsnį. Du iš jų turi žiedo formą, o trečias – įprastą Gauso skirstinio formą. Tokio šilumos šaltinio modelio pasirinkimą lemia prielaida, kad lazerinio mikroapdirbimo būdu paveikto bandinio paviršiaus išgarinto metalo kiekis proporcingas lazerio poveikio energijos tankiui.

Skaitinio modeliavimo metu buvo nustatyta, kad sukepinto ir lazeriu paveikto bandinio išlydyto metalo vonelėje temperatūros pasiskirstymas (6 pav.) tiesiogiai priklauso nuo šilumos šaltinio modelio. Žemesnių temperatūrų diapazone (iki medžiagos lydymosi temperatūros) šilumos šaltinio modelio forma mažiau veikia temperatūros pasiskirstymą bandinyje lazerinio mikroapdirbimo metu.



6 pav. Temperatūros pasiskirstymas lazerinio mikroapdirbimo metu, lazerio impulso trukmė 6 ms

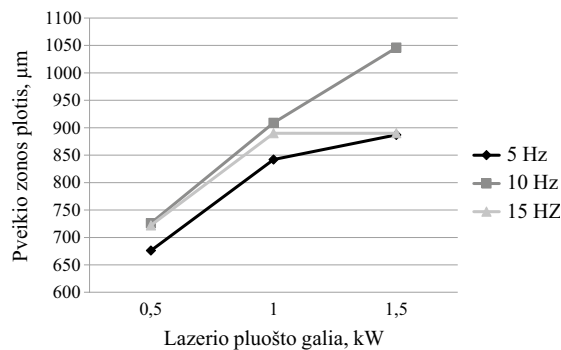
Fig. 6. Temperature distribution of laser micro polishing. Laser pulse duration of 6 ms

Atliekant lazerinio mikroapdirbimo parametrų įtakos apdoroto bandinio paviršinio sluoksnio poveikio zonos dydžiui tyrimą, buvo nustatyta, kad keičiant lazerio galią nuo 0,5 iki 1,5 kW ir esant impulso dažniui nuo 5 Hz iki 15 Hz, sukepinto bandinio poveikio zonos plotis didėja nuo 675 μm iki 1050 μm . Lazerio pluošto parametrų įtaka bandinio poveikio zonos dydžiui parodyta 7 pav.

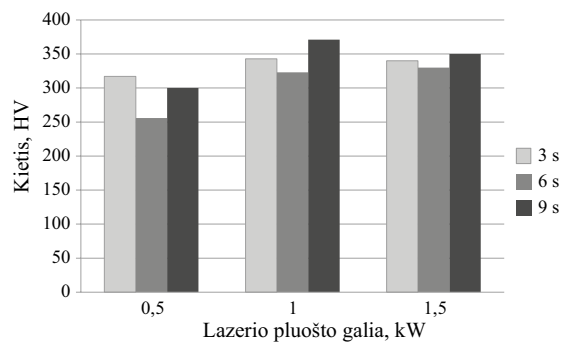
Tiriant lazerio poveikio laiko įtaką bandinio apdoroto sluoksnio kietumui, pastebėta, kad, didinant lazerio pluošto galią nuo 0,5 kW iki 1,5 kW, medžiagos kietumo pokyčio tendencija yra didėjanti (8 pav.).

Sukepinto ir apdoroto lazeriu bandinio medžiagos kietumo priklausomybė nuo lazerio poveikio laiko rodo, kad, esant tam tikroms lazerio pluošto galios ir lazerio poveikio laiko reikšmėms, galima pasiekti didžiausią paviršinio sluoksnio kietumo reikšmę. Didžiausia apdoroto bandinio kietumo reikšmė 371 HV, pasiekta esant 9 s lazerio poveikio trukmei ir 1 kW lazerio pluošto galiai.

Atlikus bandinių optinę mikroskopiją, visose bandinio zonose pastebima ryški struktūros perėjimo riba tarp lazerio pluoštu paveiktų ir neapdorotų medžiagos zonų (9 pav.).

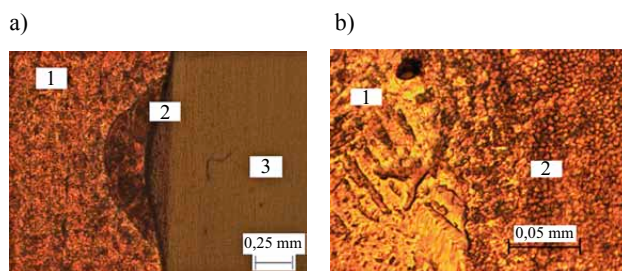


7 pav. Lazerio pluošto galios ir impulsų generacijos dažnio įtaka bandinio poveikio zonos dydžiui (lazerio dėmės skersmuo 0,3 mm, impulso trukmė 6 ms, poveikio laikas 3 s)
Fig. 7. The influence of laser power and the frequency of pulse generation on the surface treatment area (laser spot diameter of 0.3 mm, laser pulse duration of 6 ms, treatment time of 3 s)



8 pav. Lazerio pluošto galios ir poveikio laiko įtaka apdoroto bandinio kietumui (impulsų generacijos dažnis 10 Hz, impulso trukmė 6 ms, lazerio dėmės skersmuo 0,3 mm)

Fig. 8. The influence of laser power and treatment time on the hardness of the samples (pulse generation under the frequency of 10 Hz, laser pulse duration of 6 ms, laser spot diameter of 0.3 mm)



9 pav. Lazerio pluoštu paveiktų bandinių mikrostruktūra:
a) padidinimas mikroskopu 20 kartų; b) padidinimas mikroskopu 190 kartų; 1 – neapdoroto sukepinto bandinio zona; 2 – lazerinio mikroapdirbimo būdu apdoroto sukepinto bandinio zona; 3 – epoksidinė derva (impulsų generacijos dažnis 10 Hz, lazerio pluošto galia 0,5 kW, lazerio dėmės skersmuo 0,3 mm)

Fig. 9. The microstructure of laser treated samples: a) $\times 20$; b) $\times 190$; 1 – nontreated area of the sample, 2 – laser micro polished area of the sample, 3 – epoxy resin (pulse generation under the frequency of 10 Hz, laser power of 0.5 Kw, laser spot diameter of 0.3 mm)

Sukepinto ir lazeriu apdoroto bandinio metalo struktūra yra žymiai smulkesnė negu tik sukepinto. Tokiai smulkiagrūdei perlydyto metalo struktūrai yra būdingos geresnės mechaninės medžiagos savybės (smūginis tūsumas, kietumas ir t. t.).

Išvados

1. Atliekant sukepintų bandinių apdorojimo lazeriu tyrimą, nustatyta, kad lazerinio mikroapdirbimo metu sukepinto bandinio paviršiuje formuojasi centrinė poveikio sritis ir dvi ryškios žiedo formos zonos. Toks lazerio poveikio intensyvumo pasiskirstymas veikia bandinio paviršinio sluoksnio temperatūros reikšmes ir skystojo metalo vonelės dydį bei formą.
2. Atliekant sukepintų bandinių lazerinio mikroapdirbimo technologinių parametrų įtakos tyrimą, nustatyta, kad apdoroto bandinio poveikio zonos plotis ir kietumas priklauso nuo lazerio pluošto galios. Didžiausia apdoroto bandinio kietumo reikšmė 371 HV, pasiekta esant 9 s lazerio poveikio trukmei ir 1 kW lazerio galiai.
3. Atliekant lazerio pluoštu paveiktų bandinių mikrosuktūros tyrimą, pastebėta, kad sukepinto ir lazeriu apdoroto bandinio metalo struktūra yra žymiai smulkesnė negu tik sukepinto. Tokia smulkiagrūdė perlydyto metalo struktūra yra geresnių mechaninių savybių (smūginio tūsumo, kietumo ir t. t.).

Literatūra

- Das, S., *et al.* 1999. Processing of titanium net shapes by SLS/HIP, *Materials & Design* 20: 115–121.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00017-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00017-5)
- Yin, J., *et al.* 2012. Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering, *Computational Materials Science* 53(1): 333–339.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.09.012>
- Lamikiz, A., *et al.* 2007. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47: 2040–2050.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013>
- Liu, J. H., *et al.* 2007. Manufacturing metal parts via indirect SLS of composite elemental powders, *Materials Science and Engineering: A* 444: 146–152.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.070>
- Loh, L.-E., *et al.* 2014. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80: 288–300.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014>
- Maeda, K.; Childs, T. 2004. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings, *Journal of Materials Processing Technology* 149(1–3): 609–615.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024>

Ratnadeep, P.; Anand, S. 2012. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, *Journal of Manufacturing Systems* 31(4): 429–437.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.004>

Rossi, S., *et al.* 2004. Improvement of surface finishing and corrosion resistance of prototypes produced by direct metal laser sintering, *Journal of Materials Processing Technology* 148(3): 301–309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.02.001>

Shao, T. M., *et al.* 2005. An approach to modelling of laser polishing of metals, *Surface & Coatings Technology* 197: 77–84.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.010>

Wang, Y, *et al.* 2009. Thermal fatigue behavior of an iron-based laser sintered material, *Materials Science and Engineering: A* 513–514: 64–71.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.053>

Wissenbach, K. 2009. *Tailored light 2. Laser application technology*. Springer Berlin Heidelberg, 173–239.

RESEARCH ON LASER MICRO POLISHING OF SLS TECHNOLOGY SINTERED IRON-BASED POWDER SURFACE

G. Vaitkūnaitė, V. Markovič, O. Černašėjus

Abstract

The article analyzes laser micro polishing of 1.2083 steel samples produced applying selective laser sintering (SLS) method. The study has evaluated the distribution of the shape, size and temperature of the laser beam treated area in the surface layer of sintered and laser polished samples. Experimental tests have shown the impact of the technical parameters of laser micro polishing on the width and hardness of the impact zone of the treated sample. The microstructure analysis of laser treated and untreated areas of the material has been made.

Keywords: SLS technology, laser micro polishing, numerical modelling, mechanical properties, microstructure analysis.