

LAZERINĖS MILTELIŲ SUKEPINIMO TECHNOLOGIJOS ANALIZĖ

Vladislav Markovič¹, Olegas Černašėjus², Valdemar Prokopovič³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹Vladislav.Markovič@vgtu.dok.lt; ²olegas.cernasejus@vgtu.lt; ³Valdemar.Prokopovič@vgtu.dok.lt

Santrauka. Nagrinėjama lazerinės miltelių sukepinimo technologijos esmė, fizikiniai ir mechaniniai proceso pagrindai bei pritaikymo sritys. Straipsnyje pateikta lazerinio miltelių sukepinimo proceso, pagrindinių proceso eigą veikiančių dedamųjų ir miltelių, kaip pagrindinės žaliavos, charakteristikų analizė.

Reikšminiai žodžiai: sukepinimas, lazeris, milteliai, režimai.

Įvadas

Naujų ir modernių technologijų kūrimas bei pritaikymas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, skatinančių šalies ekonominių rodiklių augimą. Ekonominio nuosmukio metu itin paklausios ir aktualios technologijos bei įrenginiai, naudojantys minimumą žaliavų ir suteikiantys maksimumą rezultatų. Šis teiginys puikiai apibūdina inovatyvią, progresyvią, pažangią, ekonomiškai naudingą lazerinę miltelių sukepinimo (SLS) technologiją (Kriviliov *et al.* 2010). Čia, pasitelkus naujausius inžinerinius laimėjimus, modifikuojami, tobulinami gaminių paviršiai, suteikiant jiems naujas charakteristikas. SLS perspektyvi automobilių, mašinų, statybos, kosmonautikos, lėktuvų, spaudos, medicinos ir kitose srityse (Antonov *et al.* 2011; Nazarov *et al.* 2012).

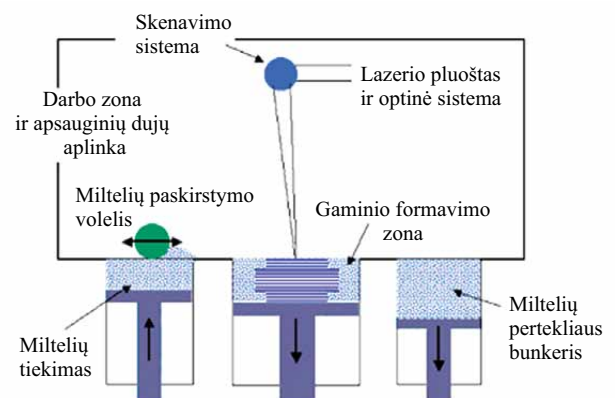
Siekiant sukurti produktą, atitinkantį normatyvus ir techninę dokumentaciją, būtina naudoti kokybiškas žaliavas, aukštos klasės įrangą, turėti kvalifikuotą personalą, geras darbo aplinkos klimatinės sąlygas, ergonomiką ir kt. Tačiau visi šie gaminių kokybę lemiantys rodikliai tampa bereikšmiai, jei nemokame tinkamai parinkti lazerinio įrenginio apdirbimo režimų. Skenavimo greitis, spindulio galia, impulsų dažnis, apsauginių dujų kiekis, miltelių sluoksnio storis – tai yra fizikiniai ir technologiniai rodikliai, kurių pokytis mažame diapazone pakeičia būsimą gaminio kokybę, pritaikymo sritį ir eksploatacines charakteristikas (Kostenkov *et al.* 2012; Nazarov *et al.* 2010).

Proceso esmė

Lazerinis miltelių sukepinimo procesas grindžiamas aktyviai pastaruoju metu plėtojamu selektyviu lazeriniu sukepinimu (*selective laser sintering* – SLS), kai skirtingų lydymosi temperatūrų medžiagos yra veikiamos koncentruotosios energijos lazerio pluoštu (1 pav.).

Proceso lankstumas pasiekiamas dėl tiesioginio kompiuterinio valdymo ir, skirtingai nuo tradicinių būdų, kur reikalingas mechaninis apdirbimas, čia trimatė detalė kuriama sukepinant plonus miltelių sluoksnius (Šiškovskis 2011).

Lazerinis miltelių sukepinimas – tai pasikartojantis procesas (1 pav.), susidedantis iš kelių etapų:

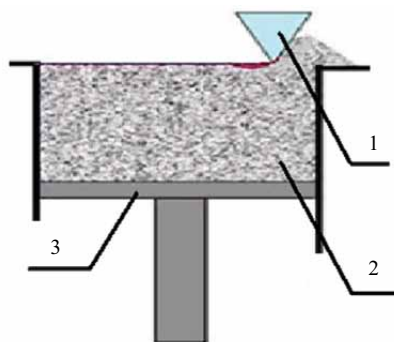


1 pav. SLS principinė schema

Fig. 1. The scheme of SLS process

Padengimas miltelių sluoksniu ir jo lyginimas voleliu. Tai yra žaliavos – miltelių formavimo ir paskirstymo etapas. Gaminys formuojamas sluoksnis po sluoksnio. Stūmoklis 3 (2 pav.) išstumia reikalingą miltelių kiekį (aukštis Δh) (Reshetnikovas *et al.* 2011).

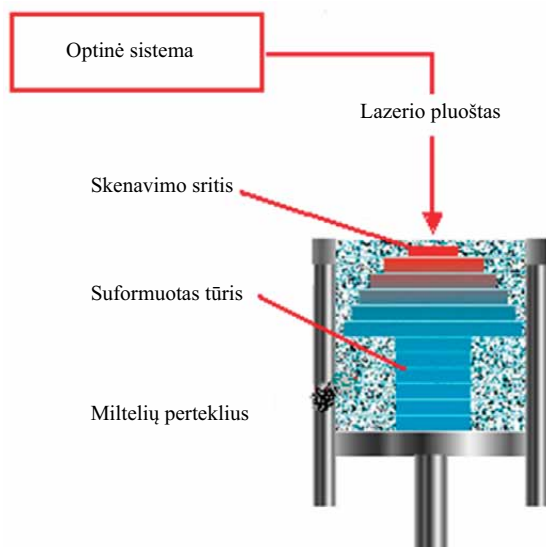
Voleliu 1 miltelių kiekis tolygiai paskirstomas darbo zonoje (2 pav.).



2 pav. Tolygusis miltelių paskirstymas: 1 – volelis; 2 – milteliai; 3 – stūmoklis

Fig. 2. Powder distribution: 1 – roller; 2 – powder; 3 – piston

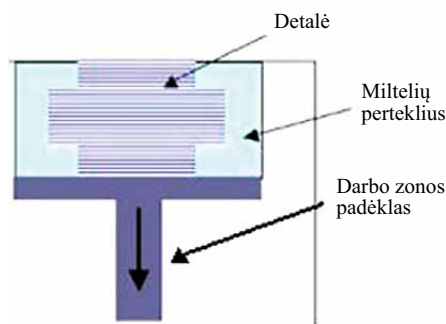
Lokalinis miltelių sluoksnio lazerinis sulydymas (skenavimas) – tai tolygiai darbo zonoje paskirstytų miltelių lokalinis sulydymas (sukepinimas arba skenavimas) koncentruotosios energijos lazerio pluoštu (3 pav.). Skenavimo greitis priklauso nuo naudojamų žaliavų, apsauginių dujų sudėties, gaminio dydžio ir norimų jo charakteristikų.



3 pav. Lazerinio skenavimo schema
Fig. 3. The scheme of laser scanning

Suformuoto sluoksnio valymas – tai selektyviuoju būdu sukepinimo tūrio valymas nuo miltelių pertekliaus. Proceso sklandumui užtikrinti milteliai voleliu pernešami į perteklinį miltelių bunkerį pakartotinai juos naudoti.

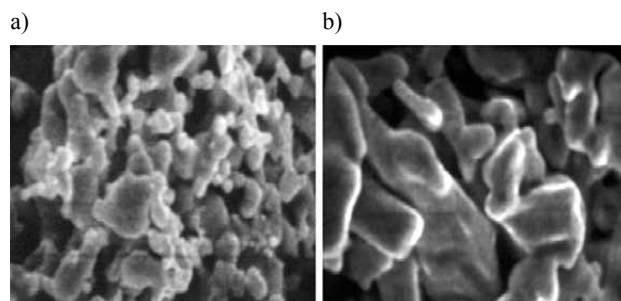
Padėklo pasitraukimas žemyn per suformuoto sluoksnio storį. Norint suformuoti naują gamybinį sluoksnį, būtina darbo zonoje esantį padėklą (4 pav.) nuleisti žemyn per naujai formuojamo sluoksnio storį Δh . Atsižvelgiant į užsibrėžtas būsimojo gaminio kokybines charakteristikas, šis dydis gali svyruoti nuo 10 iki 50 μm .



4 pav. Padėklo pasitraukimas žemyn
Fig. 4. Tray retreat down

Suformuotas gaminio paviršius – tai sudėtinga struktūra, kuriai būdingos netastabilios fazės. Struktūra išsiskiria tuo, jog ją sudaro skirtingo dydžio tarpusavyje susijusios porų sistemos, kurių dydis yra nuo kelių nanometrų iki keliolikos mikrometrų (Charanževskis, Ipatov 2011).

Optimalių lazerinio miltelių sukepinimo režimų paieška ir tyrimai – tai labai sudėtingas, laikui imlus ir kruopštus procesas. Tik labai siaurame sukepinimo režimų diapazone pasiekiami geri kokybiniai sukepinimo sluoksnio parametrai. Lazerinis sukepinimas lemia miltelių struktūrinių dedamųjų sumažėjimą ir jų geometrinių formų pokytį (5 pav.).



5 pav. Lazerinis miltelių sukepinimas (a) ir tradicinis miltelių sukepinimas (b)

Fig. 5. Laser powder sintering (a), traditional powder sintering (b)

Pagrindiniai SLS valdymo parametrai

Lazeriniam sukepinimui itin didelę reikšmę turi teisingai nustatyti pagrindiniai technologinio proceso valdymo parametrai (Panchenko *et al.* 2011; Krivilev *et al.* 2010). Prie tokių priskiriami:

– P_{fact} – faktinė spinduliavimo galia. Parenkama atsižvelgiant į naudojamų miltelių lydymosi temperatūrą, šilumos laidumo koeficientą, miltelių grūdelių geometriją. Spinduliavimo galia tiesiogiai lemia kristalizacinio proceso eigą (laiką). Kiekybiškai tai išreiškiama skystosios fazės kiekiu vieno impulso metu. Optimalus skystosios fazės kiekis – 15 %, bet neleistina perkaitinti medžiagos.

– f – impulsų dažnis. Modeliavimas neparodė esminės šio parametro reikšmės miltelių dalelių sulydymui. Faktiškai dažnis rodo spinduliavimo impulsų, tenkančių vienam miltelių sluoksniui taškui, kiekį, esant tam tikram spindulio judėjimo greičiui, t. y. parodo šiluminės energijos kiekį, kuris buvo įvestas į miltelių sluoksnį. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į lazerinio spindulio generacijos specifiką. Impulsų dažnis lemia galios pasiskirstymą impulso veikimo metu. Sumažėjus dažniui, akimirksniu išauga ribinė impulso galios reikšmė. Impulsų dažnio mažinimas lemia apdirbamo miltelių ploto perkaitinimą ir virimą, dėl ko labai sumažėja skystosios fazės kiekis. Didinant impulsų dažnį, pasiekiamas tolygus miltelių sluoksnių kaitinimas, kartu sumažėja bandinių įkaitinimo ir atšalimo greičiai.

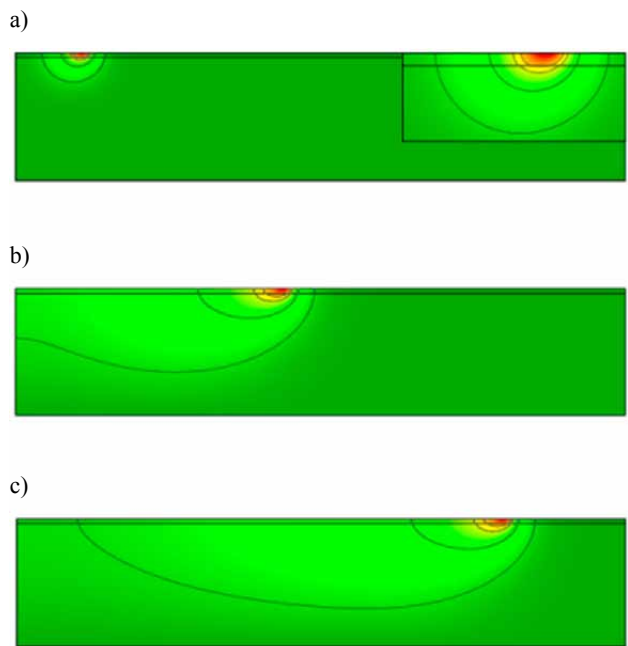
– V_b – spindulio judėjimo greitis (skenavimo greitis), lemiantis miltelių plotui (taškui) tenkančių impulsų skaičių. Skenavimo greitis parenkamas atsižvelgiant į medžiagos lydymosi temperatūrą. Sunkiai lydžios medžiagos skenavimo greitis yra mažesnis nei medžiagų su mažesne lydymosi temperatūra. Skenavimo greitis V_b tiesiogiai priklauso nuo sukepinto sluoksnių gylio l . Lazerio spindulio judėjimo greičio pokytis nuo 50 iki 150 mm/s lemia sukepinto miltelių sluoksnių sumažėjimą nuo 95 iki 50 μm . Taigi, skenavimo greitis yra efektyvus proceso valdymo parametras, nes jį keičiant galima keisti sukepimo ir kristalizacijos eigą, kas labai veikia bandinių mikrostruktūrą (Antipov *et al.* 2011).

– α – prasiskverbimo koeficientas, leidžiantis keisti sukepimo gylį l nuo 80 iki 140 μm , kai $V_b = 50$ mm/s. Šis parametras priklauso nuo apdirbamos medžiagos poringumo ir miltelių spinduliavimo sugerties koeficiento.

Sukepintojo sluoksnių storio vertinimas

Teisingai parinkus pagrindinius SLS proceso valdymo parametrus, vyksta nepertraukiamas ir tolygus miltelių (žaliavos) sulydymas. Šiuo atveju kiekvienas miltelių paviršiaus taškas gauna vienodą skaičių impulsų, kas sukelia kvazistacionarų formavimąsi aplydymo zonoje (Saprikin *et al.* 2010; Kostenkov *et al.* 2012). Terminio poveikio zonos šiluminio lauko pasiskirstymo dinamika parodyta 6 pav.

Iš grafikų matyti, kad sukepimo proceso pradžioje formuojasi aplydymo zona (6 pav., a), esant daliniam miltelių sluoksnių išlydymui. Skenavimo metu, lazerio spinduliui judant miltelių paviršiumi, jie kartu su pagrindu tolygiai kaista, didėja išlydyto metalo tūris, kol pasiekiamas pilnas sulydymo gylis (Krivilev *et al.* 2012). SLS proceso metu būtina tolygiai sulydyti visą formuojamųjų miltelių sluoksnį, užtikrinant paviršinio sluoksnių (dangos) patvarumą mechaniniam poveikiui. Tai pasiekama įkai-



6 pav. Šilumos lauko dinamika: pagrindo medžiaga – vidutinio anglingumo plienas, storis – 1 mm; formuojamųjų miltelių sluoksnių storis – 40 μm ; a, b, c poveikio laikas – atitinkamai 1, 12, 24 ms; skenavimo greitis – 0,15 m/s

Fig. 6. Dynamic of temperature area. The base material – mild steel; thickness – 1 mm; powder thickness – 40 μm ; a, b, c influence time – 1, 12, 24 ms; scanning speed – 0,15 ms

tinant substrato paviršių, dėl ko suformuojamos kontakto taškų tarp miltelių ir substrato užuomazgos. Skenavimo procesui pasiekus pusiausvyros būseną (darbinę fazę), sulydymo tarp substrato ir miltelių zona padidėja 20–30 % (6 pav., b, c).

Išvados

Atlikta lazerinio miltelių sukepimo analizė parodė, kad mechaninė proceso dalis – tai pasikartojantis procesas, susidedantis iš keturių esminių etapų: miltelių sluoksnių tiekimo ir paskirstymo darbo zonoje, apdorojamųjų miltelių sluoksnių sukepimo – skenavimo, miltelių pertekliaus surinkimo ir padėklo su formuojamuoju gaminiu persilinkimo žemyn per naujai formuojamojo sluoksnių storį.

SLS būdu suformuotų gaminių kokybinių charakteristikų reikšmės labiausiai veikia šie įrenginio valdymo parametrai: faktinė spinduliavimo galia, lazerio spindulio formavimo impulsų dažnis, esant kintamajai veikai, lazerio pluošto judėjimo (skenavimo) greitis.

Kokybinių gaminių parametrų reikšmėms didelę reikšmę turi šie fizikiniai parametrai: miltelių sugerties koeficientas, terminio poveikio zonos dydis, miltelių sulydymo tolygumas.

Literatūra

- Antipov, A.; Arakelan, S.; Kutrovska, S.; Kucherik, A.; Manuilova, V.; Prokoshev, V. 2011. Plieninių dangų formavimas lazerinio sukepinimo būdu, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 13(1): 52–60 (rusų kalba).
- Antonov, E.; Bagratashvili, V.; Popov, A.; Bochkova, S.; Krotova, L.; Barri, Dž.; Oreffo, P.; Choudl, S. 2011. Lazerinis miltelių sukepinimas biomedicinoje, *Journal of Perspective Materials* 10(8): 104–111.
- Charanževskis, E.; Ipatov, G. 2011. Paviršinių Fe-C-Ni sluoksnių, gautų lazerinio sukepinimo būdu, topografija ir struktūra, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 12(5): 113–117 (rusų kalba).
- Krivilev, M.; Charanževskis, E.; Gordejevas, G.; Ankudinovas, V. 2010. Miltelinių mišinių lazerinio sukepinimo valdymas, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 12(5): 105–112 (rusų kalba).
- Krivilev, M.; Gordeev, S.; Ankudinov, E.; Charanzevskis, E. 2012. Dinaminis šilumos perdavimas esant faziniams virsmams poringuose medžiaguose, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 13(2): 70–76 (rusų kalba).
- Kostenkov, S.; Charanzevskis, E. 2012. Lazerio pluošto išskaidymas sferinių detalių paviršiuose, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 13(1): 25–31 (rusų kalba).
- Kostenkov, S.; Charanzevskis, E. 2012. 2D modeliavimas pernešant lazerio pluoštą į gaminio paviršių, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 13(1): 32–37 (rusų kalba).
- Nazarov, A. 2010. Greitojo protoripavimo lazeriniu selektyviu sukepinimu perspektyvos, *Mašinų gamyba* 2(5): 40–44.
- Nazarov, A.; Okunkova, A. 2012. Tipinės detalės, gautos lazerinio sukepinimo metodu, *Chemija ir cheminės technologijos* 4: 18–23.
- Panchenko, V.; Aleksandrov, V.; Vasilcov, V.; Grigorjev, A.; Egorov, E.; Karcev, V.; Lebedev, F.; Misiurov, A. 2011. Galingas CO₂ lazeris selektyviam lazeriniam sukepinimui, *Medžiagų apdirbimo fizika ir chemija* 12: 5–9.
- Reshetnikovas, S.; Charanževskis, E.; Kriviliovas, G.; Sadiokov, E. 2011. Katodiniai vandelinio junginiai kompozito sluoksnių paviršiuje gautu lazerinio sukepinimo būdu, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 13(2): 21–25 (rusų kalba).
- Saprikin, A.; Saprikina, N.; Shigaev, R. 2010. Varinio elektrodo gamyba pritaikant lazerinio sukepinimo metodą, *Udmurdsko valstybinio universiteto žurnalas* 12(7): 32–37 (rusų kalba).
- Šiškovskis, I. 2011. Metalų polimerinių kompozitų su nano junginiais selektyvino lazerinio sukepinimo pagrindai, *Journal of Perspective Materials* 10(8): 98–103.

ANALYSIS OF LASER SINTERING TECHNOLOGY

V. Markovič, O. Černašėjus, V. Prokopovič

Abstract

The new, high-tech development and customization is one of the most important factors in promoting the country's economic growth indicators. The economic downturn in the industry requires technology and equipment using a minimum of raw materials and providing maximum performance. This statement perfectly describes the innovative, forward-looking,

cost-effective laser powder sintering (SLS) technology. Here, thanks to the latest engineering achievements, product surfaces are modified and improved, they gain new characteristics. SLS is viable in automobile, engineering, construction, aerospace, aircraft, printing, medical and other areas.

In order to create a product which meets the standards and technical documentation it is necessary to use and ensure high quality of raw materials, high-end equipment, qualified personnel, the working environment with proper climatic conditions, ergonomics, etc. But all of these, the quality of the product becomes the decisive indicators meaningless if know how to properly select the laser processing operation. Scanning speed, beam power, pulse frequency, protective gases, powder layer thickness – all of them are the physical and mechanical characteristics of the change in a small range changes the quality of the product of the future, the field of application and performance characteristics.

Keywords: Sintering, laser, powder, modes.