

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Simonas Mindaugas Jankus

SLS ATSPAUSDINTŲ DETALIŲ MIKROSTRUKTŪROS TYRIMAI
A STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF THE PARTS PRINTED BY SLS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas	Simonas Mindaugas Jankus
Leista ginti	2018-05-28
Darbo vadovas	dr. Genrik Mordas
Konsultantas	dr. Vitalija Jasulaitienė
Lazerinių tyrimų centro direktorius	prof. dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

1. Literatūros apžvalga	5
1.1. Adityvi gamyba	5
1.2. Selektivaus lazerinio sukepinimo technologija (SLS)	9
1.3. Lazerio pluošto skenavimo sistemos, skenavimo tipai, pluošto fokusavimas procese.....	12
1.4. Fizikinių parametrų įtaka SLS būdu pagamintų detalių kokybei.....	14
1.5. Miltelinės medžiagos	17
2. Darbo metodika	21
2.1. Inventor Professional 2018 ir SOLIDWORKS 2018 CAD projektavimo įranga.....	21
2.2. Pramoninis EOS EOSINT M280 selektivaus lazerinio sukepinimo spausdintuvas	22
2.3. Skenuojantys Helios NanoLab 650 ir JEOL JSM-6490LV elektroniniai mikroskopai.....	23
2.4. Poliarizuotos šviesos mikroskopas Olympus BX51	24
2.5. Optinis profilometras SensoFar PLμ2300	25
3. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas.....	27
3.1. Metalo mikrodalelių cheminės sudėties ir dalelių dydžio pasiskirstymo tyrimas	27
3.2. SLS proceso technologinių parametrų parinkimas	28
3.3. Atspausdintų mėginių mikrostruktūros tyrimai	31
3.3.1. Mėginių skerspjūvio mikrostruktūros tyrimai.....	31
3.3.2. Mėginių paviršiaus mikrostruktūros tyrimai	35
3.3.3. Atspausdintų detalių paviršiaus šiukštumo matavimo rezultatai	37
3.3.4. Kristalinės sandaros nustatymas.....	38
Išvados	41
Literatūros sąrašas	42
Rezultatų viešinimas.....	46
Santrauka lietuvių kalba	47
Santrauka anglų kalba / Summary	48
Priedai.....	49

IVADAS

Aukštųjų technologijų kūrimas bei pritaikymas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, skatinančių šalies ekonominių rodiklių augimą. Ekonominio nuosmukio metu itin paklausios ir aktualios technologijos bei įrenginiai, naudojančys minimumą žaliavų ir suteikiantys maksimumą rezultatų. Šis teiginys puikiai apibūdina pažangią, ekonomiškai naudingą lazerinę miltelių sukepinimo (SLS) technologiją [1]. SLS lazerinė technologija yra perspektyvi automobilių, mašinų, statybos, kosmonautikos, lėktuvų, spaudos, medicinos ir kitose srityse. 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 [1]. Lazerinėms sukepinimo technologijoms plačiai naudojamos polimerinės medžiagos – polikarbonatas, polivinilo chloridas, ABS, nailonas, poliesteris, polipropilenas, poliuretanai. Tobulėjant SLS technologijoms, sukepinami gaminiai jau gali būti naudojami ne tik kaip prototipai, bet ir kaip funkcionuojančio mechanizmo dalys. Dažniausiai tokiems, geromis technologinėmis ir mechaninėmis savybėmis pasižymintiems, gaminiams sukepinami naudojami įvairūs metalo pagrindo milteliai: nerūdijančiojo plieno, konstrukcinio plieno, titano, chromo, geležies, aliuminio. Taikant lazerinio sukepinimo būdą, naudojami metalai ir jų lydiniai, galintys suteikti sukepinamam gaminiui būtinas eksploatacines ir funkcines savybes [1].

Siekiant sukurti gaminį, atitinkantį techninę dokumentaciją, būtina naudoti kokybiškas medžiagas, aukštos klasės įrangą, turėti kvalifikuotą personalą, geras darbo aplinkos klimatinės sąlygas, ergonomiką ir kt. Visi šie gaminio kokybę lemiantys rodikliai tampa bereikšmiai, jei nemokame tinkamai parinkti medžiagų bei lazerinio apdirbimo režimų. Miltelių medžiagų cheminė sudėtis, spindulio galia, skenavimo greitis, impulsų dažnis, apsauginių dujų kiekis, miltelių sluoksnio storis, miltelių sijojimas, padėklo lygumas bei tinkama spausdinimo strategija – tai yra fizikiniai ir technologiniai rodikliai, kurių pokytis mažame diapazone pakeičia būsimojo gaminio kokybę, pritaikymo sritį ir technines charakteristikas [1].

Taigi, magistro baigiamojo darbo tikslas:

- Įvaldžius selektyvaus lazerinio metalo miltelių sukepinimo technologiją (SLS), ištirti atspausdintų detalių mikrostruktūrą.

Šiam tikslui pasiekti būtina atlikti žemiau išvardintus uždavinius:

- Ištirti metalo miltelių (316L, GP1, MP1) cheminę sudėtį ir dalelių dydžių pasiskirstymą.
- Įvaldyti lazerinį metalo spausdintuvą EOS EOSINT M280, paruošti mėginių CAD modelius ir parinkti SLS proceso technologinį režimą.
- Atlikti atspausdintų mėginių skerspjūvio ir paviršiaus mikrostruktūros analizę, nustatyti paviršiaus šiurkštumą ir lydinių kristalinę sandarą.

1. Literatūros apžvalga

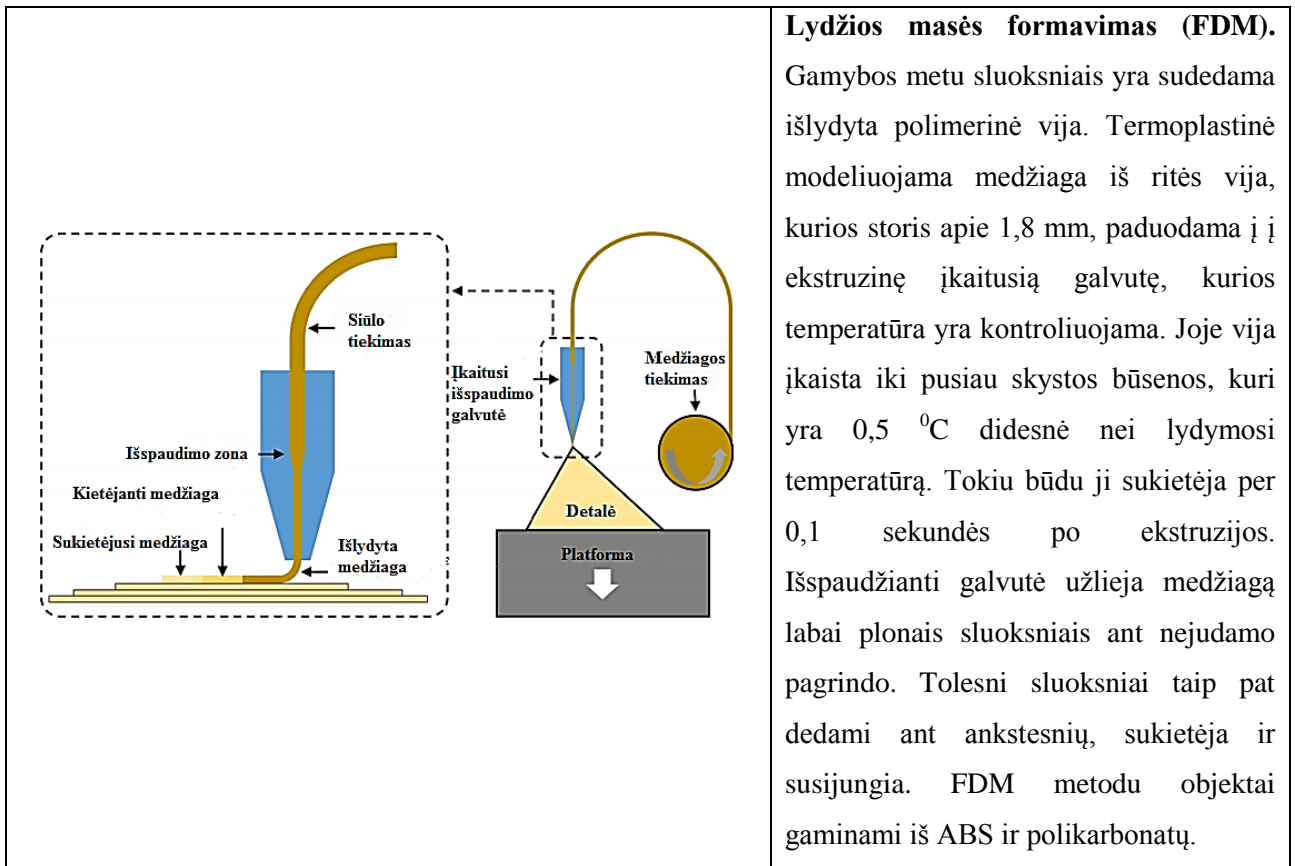
1.1. Adityvi gamyba

Adityvi gamyba plačiausiai naudojama įvairiems mechaniniams gaminiams gaminti, elektronikos bei elektrotechnikos pramonėje. Tiksliosios mechanikos, elektronikos ir elektrotechnikos komponentai labiausiai paplitę šiuolaikiniuose gaminiuose. Jie gali sudaryti tik gaminio korpusą, rėmą ar kitokius bazinius jo elementus, bet dažnai yra pagrindiniai gaminio konstrukcijos elementai. Šie komponentai gaminami iš įvairių medžiagų, pavyzdžiui, juodųjų ir spalvotųjų metalų, kompozitų, plastmasių ir kt. Jų matmenų gama yra plati, t. y. nuo mikrometrinių dalių (preciziniuose valdymo ir gamybos įrenginiuose, taip pat mechatronikoje) iki šimtų metrų (transporto priemonės, įrengimai chemijos ir metalurgijos pramonei, kt.). Modeliuojant ir gaminant mechaninius ar elektroninius komponentus susiduriama su šiais iššūkiais: geometrinės formos sudėtingumas, aukštas tikslumas, didžiulė įvairovė, maža gamybos apimtis ir trumpa gamybos trukmė. Moderniosios gamybos aplinkoje pastebima didesnė gaminių įvairovė, dažniau keičiami jų tipai, o tai turi tiesioginę įtaką komponentų geometrinei formai kisti. Šiandien vartotoją gali pritraukti tik tas gamintojas, kuris greičiau pateikia rinkai patrauklesnių formų ir geresnių parametru gaminius [1]. Gaminio geometrijai bei tikslumui išpildyti naudojami tradiciniai apdirbimo metodai (precizinis mechaninis tekinimas, tikslusis liejimas, frezavimas ir pan.), kurie turi daug trūkumų didelės įvairovės ir mažų serijų gamyboje (didelė gamybos trukmė, daug rankų darbo, didelės gamybos sąnaudos, nes reikia aukštos kvalifikacijos darbuotojų, ir pan.). Gaminių sudėtingai geometrinei formai greitai gauti pastaruoju metu pradėtos naudoti naujausios gamybos technologijos. Pagrindinė tradicinių technologijų problema, gaminant sudėtingos formos detalę yra ta, kad reikia nemažai laiko, norint gauti realų daiktą, įskaitant jo projektavimą kompiuteriu, gamybą ir pristatymą vartotojui. Visos tradicinės detalių gamybos technologijos grindžiamos nereikalingos medžiagos šalinimu nuo pradinio ruošinio, kuris visada būna didesnis už gatavą detalę. Prieš daugiau nei šimtmetį pradėtas naudoti adityvios gamybos metodas, padedantis greitai ir pigiai spręsti minėtas problemas [1].

Adityvios gamybos technologijos pagrindinė dalis sparti prototipų bei detalių gamyba, naudojanti aukštąsias ir lazerines technologijas, kuriomis reikiama detalė ar gaminys gaminamas dedant vieną medžiagos sluoksnį ant kito iki detalės gamybos pabaigos [2, 3].

1.1 lentelė. Pagrindiniai 3D spausdinimo tipai [1, 4].

	<p>Lazerinis metalo miltelių sukepinimas (SLS). Metalinių (titano, kobalto-chromo, volframo, molibdeno, nikelio, nerūdijančio plieno, įrankinio plieno, poliamidas, nailono kompozitai, poliesteris kt.) miltelių lazerinio sukepinimo proceso metu gaminami 3D objektai sukepinant medžiagos miltelius dažniausiai nuolatinės veikos šviesolaidiniais (100-400 W) galios lazeriais. Lazeris sumoduluotas taip, kad sulipdomos tik tos dalelės, kurios turi tiesioginį sąlytį su lazerio pluoštu. Proceso metu yra naudojamos argono ar azoto dujos. Šiuo būdu gali būti pagamintos detalės 720 x 380 x 380 mm³. SLS gamybos būdu galima pasiekti iki ±50 μm tikslumą.</p>
	<p>Stereolitografija. Lazerio ultravioletinis spindulys, judėdamas 3D CAD sistemos sukurtu profiliu, kietina talpykloje esančią šviesai jautrią skystą akrilinę ar epoksidinę dervą. Dėl šviesos absorbcijos ir spinduliuotės nuostolių ši reakcija vyksta tik paviršiuje. Detalės gaminamos ant lifto platformos, kuria detalė nuleidžiama į talpyklą su derva, lygų vieno sluoksnio storiui. Lazerio skenavimo greitis priklauso nuo kietinamos medžiagos ir sluoksnio storio. SLA medžiagos yra brangios ir toksiškos.</p>



3D gamybos technologija naudinga kompanijoms, intensyviai kuriančioms naujus gaminius ir pereinančioms nuo masinės gamybos gaminių prie serijinės gamybos gaminių. Šiuo atveju reikia greitai įgyvendinti įvairius gaminių patobulinimus, pagerinimus ar atlikti vartotojo pageidaujamus pakeitimus. Todėl ji plačiai naudojama eksperimentinės gamybos įmonėse ar padaliniuose, tiesiogiai dalyvaujančiuose kuriant naujus gaminius [1].



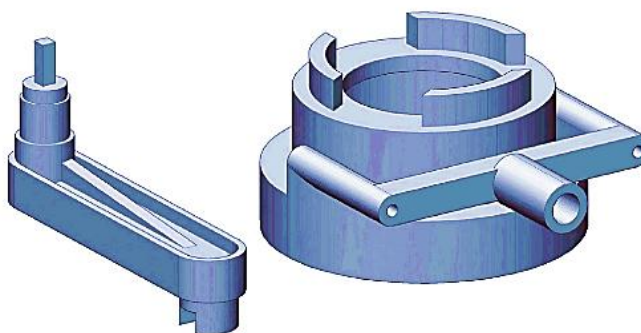
1.1 pav. 3D spausdinimo būdu pagamintų detalių pavyzdžiai [1].

Adityvios gamybos metodai per pastaruosius 20 metų padarė didžiulę pažangą, todėl tapo įmanoma juos naudoti ne tik naujiems gaminiams ar jų prototipams kurti, bet ir taikyti serijinėje šių gaminių gamyboje. Sparčios prototipų gamybos metodai padeda išvengti minėtų trūkumų, nes yra labai koncentruoti ir teikia galimybę viską daryti labai greitai. Kadangi aukštosios

ir lazerinės technologijos naujo gaminio kūrimo procese šiuolaikinės gamybos aplinkoje yra labai svarbios, detaliau aptariami pagrindiniai jų taikymo aspektai ir veikimo principai [1].

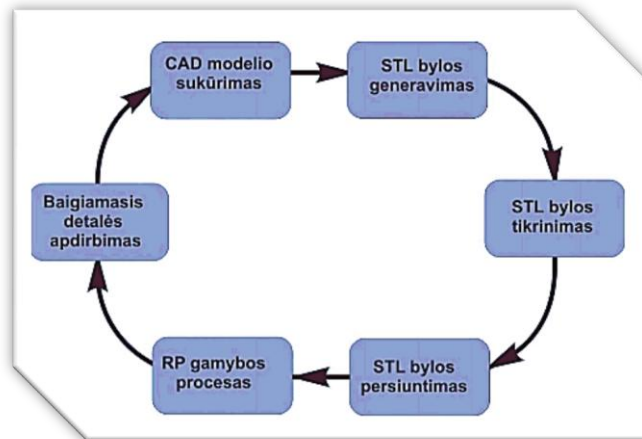
Adityvios gamybos metodai yra skirti sutrumpinti naujo gaminio kūrimo ciklą. Šiuo metu, naujų produktų kūrimas yra neatsiejamas nuo virtualiosios inžinerijos, kuri yra pagrįsta vaizdų imitacijos inžinerijos principais, naudojant skaitmeninį modeliavimą. Virtualioji inžinerija teikia galimybę gerokai sumažinti naujų gaminių kūrimo ir gamybos sąnaudas bei trukmę. Vis plačiau ji yra taikoma ir moksle, ir pramonėje [1]. Skaitmeninė inžinerija yra sudaryta iš šių etapų:

- Gaminio reikalingumo nustatymas;
- Virtualusis gaminio projektavimas (VP) naudojant 3D CAD sistemas;
- Virtualių gaminio alternatyvų įvertinimas;
- Sparti prototipo gamyba ir komercinė gaminio gamyba.



1.2 pav. 3D modelių CAD pavyzdžiai: kairėje svirtis, o dešinėje mova [1].

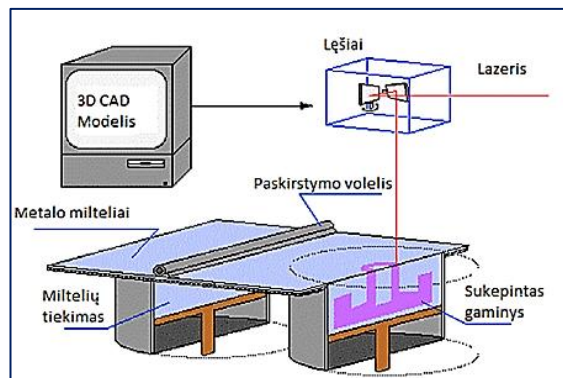
Inžinerinių objektų projektavimas CAD programomis yra sudėtingų detalių modeliavimas trimatėje erdvėje ir viso gaminio surinkimas naudojant trimačius detalių modelius (1.2 pav.). Virtualusis projektavimas dar kitaip yra vadinamas skaitmeniniu modeliavimu. Jis dažnai išplečiamas iki virtualiosios gamybos modelio (1.2 pav.), kurio tikslas ne tik virtualiai išbandyti bei testuoti VP prototipus, bet ir įvertinti realaus ar fizinio prototipo gamybos sąnaudas ir visus naudojamus standartinius elementus bei medžiagas [1]. Tokiu būdu testuojant yra tikrinamas gaminio rinkimo eiliškumas, nustatomos optimalios rinkimo judesių trajektorijos, išaiškinamos detalių sutapdinimo vietos ar tarpelių dydžiai. Naudojant sparčiai tobulėjančias VP iteracijas gali būti atliktas gaminio konstravimo optimizavimas, tačiau ypač sudėtingiems gaminiams optimizuoti gali nepakakti VP prototipo, tada šiam tikslui reikia gaminti realų bandomąjį gaminį ar prototipą, naudojant sparčios prototipų gamybos metodus. Gaminio reikalingumo nustatymas yra viena iš pagrindinių problemų, kurią gali spręsti ir gaminio užsakovai, ir kūrėjai. Dažniausiai tai daro abi šalys glaudžiai bendradarbiaudamos. Svarbu suprasti vartotojo reikalavimus, žinoti konkurentų pasiekimus, medžiagų ir standartinių komponentų tiekėjų bei galimų partnerių galimybes [1].



1.3 pav. Virtualiosios gamybos modelis [1].

1.2. Selektivaus lazerinio sukepinimo technologija (SLS)

SLS procesas pradedamas nuo trimačių modelių 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 spausdintuvui, kurį sudaro šviesolaidinis nuolatinės veikos lazeris ir metalo miltelių tiekimo sistema (1.4 pav.) [5, 6].



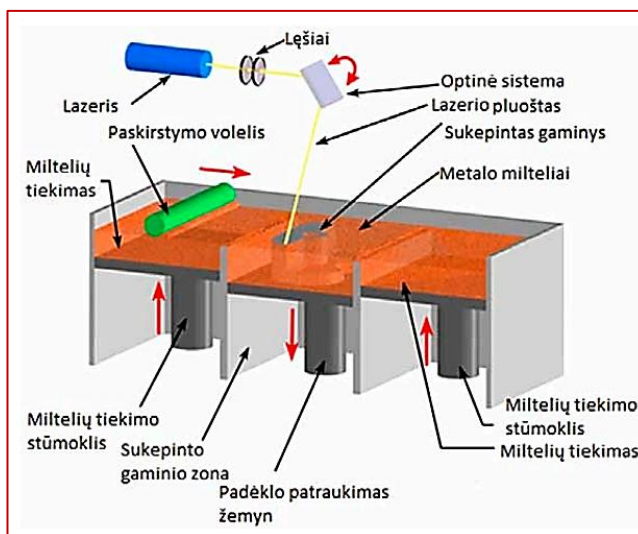
1.4 pav. SLS technologijos sistemos konfigūracija [5].

Metalo mikromilteliai tolygiai paskirstomi vienodu storiu gaminio formavimo zonos paviršiuje ir įkaitinami iki temperatūros, žemesnės nei lydymosi temperatūra. Lazerinis miltelių sukepinimo procesas grindžiamas aktyviai pastaruoju metu plėtojama selektyviuoju lazeriniu sukepinimu (selective laser sintering – SLS), kuomet miltelinės medžiagos yra veikiamos koncentruota lazerio energija. Proceso lankstumas pasiekiamas dėl tiesioginio kompiuterinio valdymo ir, skirtingai nuo tradicinių būdų, kur reikalingas mechaninis apdirbimas, čia trimatė detalė

kuriama sukepinant plonus miltelių sluoksnius [5, 6]. Lazerinis miltelių sukepinimas yra pasikartojantis procesas, susidedantis iš kelių etapų:

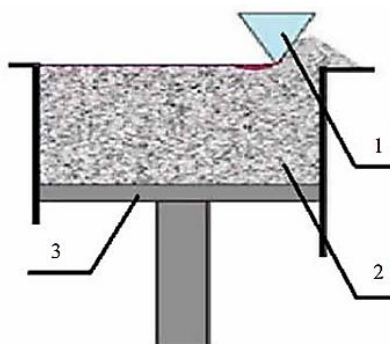
- Mikromiltelių sluoksnių tiekimas ir paskirstymas darbo zonoje.
- Apdorojimų dalelių sluoksnio sukepinimo skenuojant lazerio spinduliui (1.5 pav.).
- Miltelių pertekliaus surinkimo ir padėklo su formuojamu gaminiu perslinkimo žemyn per naujai padengiamo sluoksnio storį.

Aptarsime detaliau kiekvieną iš šių SLS proceso etapų.



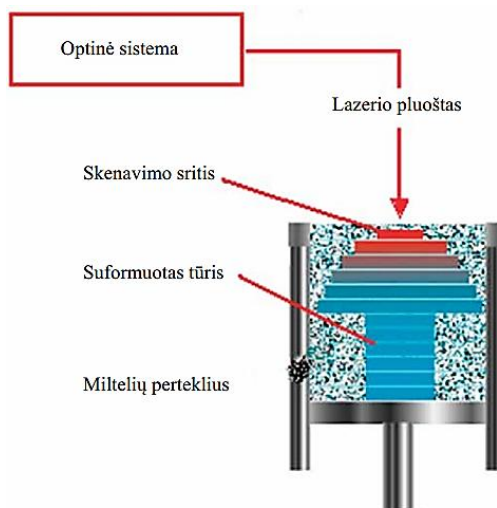
1.5 pav. Selektivaus lazerinio sukepinimo (SLS) proceso principinė schema [5].

Pirmasis SLS proceso etapas yra padengimas metalų ar polimerų mikromiltelių sluoksniu ir jo lyginimas voleliu. Tai yra metalo dalelių formavimo ir paskirstymo etapas. Gaminys formuojamas sluoksniu po sluoksnio. Stūmoklis 3 (1.6 pav.) tiekia reikalingą miltelių kiekį. Voleliu 1 mikromilteliai yra tolygiai paskirstomi darbo zonoje (gamybinė platforma)[6].



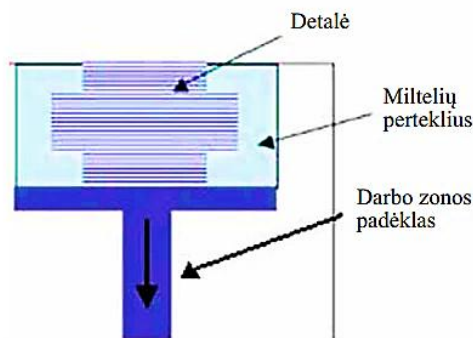
1.6 pav. Tolygaus metalo mikromiltelių paskirstymo ant gamybinės platformos principinė schema: 1– volelis, 2 – milteliai, 3 – stūmoklis [6].

Tiesioginis miltelių sluoksnio lazerinis sulydymas (skenavimas) – tai tolygiai darbo zonoje paskirstytų miltelių selektyvus sukepinimas koncentruotosios energijos lazerio pluoštu (1.7 pav.). Skenavimo greitis priklauso nuo naudojamų medžiagų, apsauginių dujų sudėties (dažniausiai naudojamos inertinės argono ar azoto dujos), gaminio dydžio ir norimų jo charakteristikų [5, 6].



1.7 pav. Lazerinio skenavimo sistema naudojanti uždaro grandinės galvanoskenerį [6].

Suformuoto sluoksnio valymo procedūra yra SLS būdu atspausdinto tūrio valymas nuo mikrodalelių pertekliaus. Proceso sklandumui užtikrinti milteliai voleliu pernešami į perteklinių dalelių bunkerį, siekiant juos pakartotinai panaudoti (reikalingas miltelių sijojimas) [5, 6]. Toliau vyksta padėklo patraukimas žemyn per suformuoto sluoksnio storį. Norint suformuoti naują gamybinį sluoksnį, būtina darbo zonoje esantį padėklą (1.8 pav.) nuleisti žemyn per naujai formuojamo dalelių sluoksnio storį. Atsižvelgiant į užsibrėžtas būsimo gaminio kokybines charakteristikas, šis dydis gali svyruoti nuo 20 iki 80 μm [5, 6].



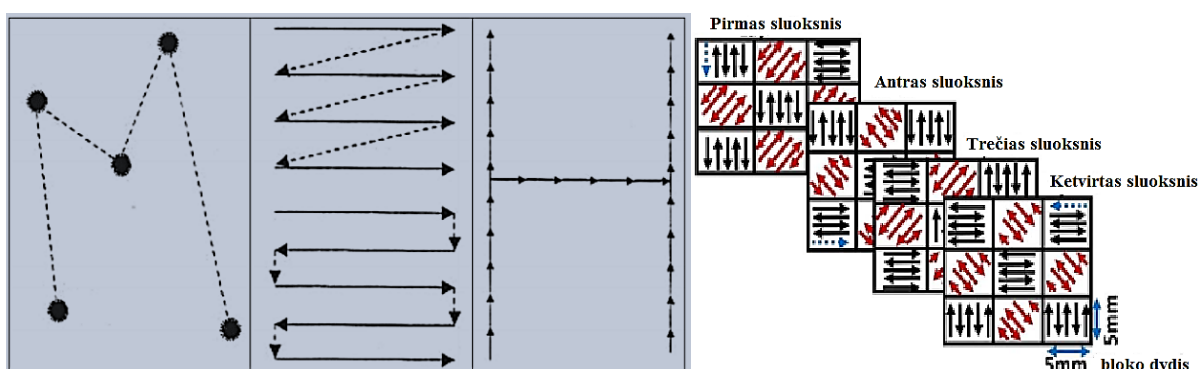
1.8 pav. Padėklo patraukimas žemyn SLS proceso metu (siekiant pakloti gamybinę platformą nauju metalo mikrodalelių sluoksniu) [6].

Suformuotas gaminio paviršius yra 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. Optimalių lazerinio miltelių sukepinimo režimų paieška ir tyrimai yra sudėtingas, laikui imlus ir kruopštus procesas. Tik labai siaurame sukepinimo režimų diapazone pasiekiami geri kokybiniai sukepinimo parametrai. Lazerinis sukepinimas lemia miltelių struktūrinių dedamųjų sumažėjimą ir jų geometrinių formų pokytį bei mikrostruktūrą [6].

1.3. Lazerio pluošto skenavimo sistemos, skenavimo tipai, pluošto fokusavimas procese

SLS gamybos technologijoje lazerio pluoštui skenuoti plačiausiai naudojamos atspindžio sistemos. Tokiose sistemose lazerio pluoštas skenuojamas naudojant veidrodžius, kurie dažniausiai yra pritvirtinami ant besisukančių laikiklių. Šiai skenavimo sistemų grupei priklauso galvanometriniai skeneriai (galvanoskeneriai), daugiabriauniai veidrodžiai (poligoniniai skeneriai), ir pjezoelektriškai valdomos trepanavimo galvutės [1]. Priklausomai nuo objekto dydžio bei formos ypatybių SLS 3D spausdiname naudojami penki skirtingi skenavimo metodai:

- a) žingsninis skenavimas,
- b) rastrinis skenavimas,
- c) vektorinis skenavimas,
- d) šachmatu lentos skenavimas,
- e) kombinuotas skenavimas apima visus aukščiau išvardintus skenavimo būdus (1.9 pav).



1.9 pav. SLS naudojamų skenavimų metodikų tipai: iš kairės į dešinę (žingsninis, rastrinis, vektorinis, šachmatų lentos tipo) skenavimai [6].

Žingsninio skenavimo metu lazerio pluoštas yra aktyvus tik tam tikrose apibrėžtose padėtyse, o pozicionavimo operacijų metu lazerinis apdirbimas yra sustabdomas. Rastrinio skenavimo metu lazerio pluoštas pasikartojančiai skenuojamas pastoviu greičiu fiksuotoje kampinėje srityje, taip visas atvaizdas nuskenuojamas serija lygiagrečių linijų. Kiekvienos linijos pabaigoje lazerio spinduliuotė yra išjungiamą ir skenavimo prietaisas grįžta į pradinę padėtį. Tokio tipo skenavimas gali būti atliekamas ir dvejomis kryptimis: iš dešinės į kairę ir atvirkščiai. Vektorinio skenavimo atveju, judesys yra sudalinamas į daug smulkių žingsnių [1]. Adityvioje gamyboje lazerio pluoštas yra fokusuojamas nuo 100 iki 500 μm diametro dėmę. Atsižvelgiant į fokusuojančios optikos padėtį skenavimo įrenginio (galvanoskenerio) atžvilgiu, 3D spausdinime plačiausiai taikomas skenavimas prieš objektyvą. Tokio tipo konfigūracijoje lazerio spinduliuotė skenuoja prieš fokusuojantį objektyvo lęšį [1].

1.2 lentelė. SLS technologijoje naudojami galvanoskeneriai ir lazerio pluoštą fokusuojanti optika [1, 7, 8].

Adityvioje gamyboje skenavimo sistemą sudaro	
Uždaro grandinės, t. y. su padėties detekcija galvanoskeneris	F-theta lęšis

Dvimatis skenavimas gali būti realizuojamas, naudojant antrą skenavimo prietaisą. Tam, kad būtų pasiektas maksimalus plokščias h dydžio laukas, yra naudojami $f-\theta$ lęšiai

$$h = 2f \tan \theta, \tag{1.1}$$

čia: f – židinio nuotolis [mm], θ – optinio skenavimo puskampis. Galvanoskeneriai adityvioje gamyboje dažniausia būna judančio magneto arba judančios ritės. Tokio tipo skeneriai yra greitesni už mechatronines judesio sistemų architektūras. Jais 3D spausdinimo metu galima skenuoti 7 m/s greičiu. Pramoniniuose selektyvaus lazerinio sukepinimo spausdintuvuose naudojami

šviesolaidiniai lazeriai, kurių galia yra nuo kelių šimtų vatų iki kelių kilovatų. Skaiduliniai lazeriai naudojami SLS/SLM technologijoje dėl sekančių kriterijų [1]:

- 1) geriausia pluošto struktūra $M^2 < 1,05$,
- 2) ilgas kaupinimo diodinių lazerių darbo laikas,
- 3) aukštas bendras našumo koeficientas,
- 4) vienamodžiais šviesolaidžiais galima gauti siaurą pluošto diametrą (iki 9 μm),
- 5) didelis mobilumas.

Ekonominiu atžvilgiu skaiduliniams lazeriams nereikia didelių investicijų [1].

1.4. Fizikinių parametrų įtaka SLS būdu pagamintų detalių kokybei

SLS lazeriniam sukepinimui itin didelę reikšmę turi teisingai nustatyti pagrindiniai technologinio proceso valdymo parametrai [9]. Prie tokių kritinių proceso parametrų priskiriami:

- 1) faktinė spinduliavimo galia P_{fact} ,
- 2) lazerio impulsų pasikartojimo dažnis f ,
- 3) spindulio judėjimo greitis (skenavimo greitis) v ,
- 4) sugerties koeficientas α .

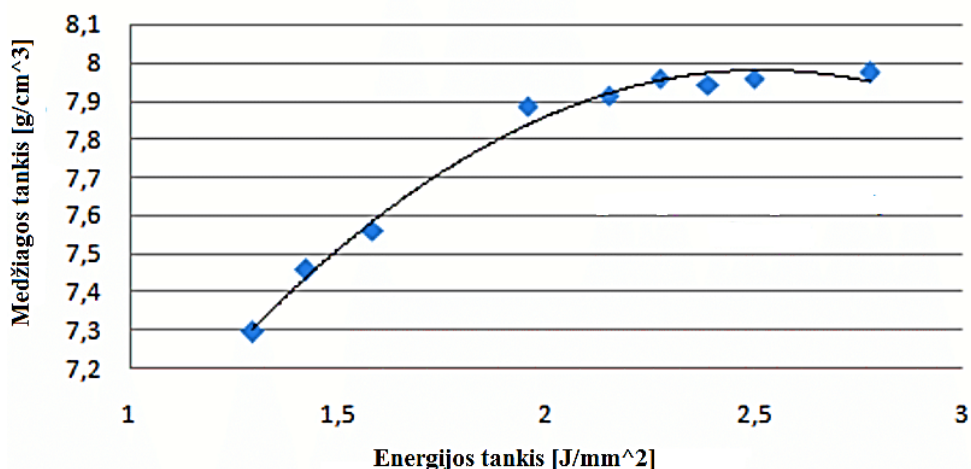
Suformuotų gaminių kokybinių charakteristikų reikšmės labiausiai veikia šie įrenginio valdymo parametrai: faktinė spinduliavimo galia, lazerio spindulio formavimo impulsų dažnis, esant kintamajai veikai, lazerio pluošto judėjimo (skenavimo) greitis. Kokybinių gaminių parametrų reikšmėms didelę reikšmę turi šie fizikiniai parametrai: miltelių sugerties koeficientas, terminio poveikio zonos dydis, miltelių sulydymo tolygumas [6]. Toliau išvardinti svarbiausi SLS gamybos parametrai:

Faktinė spinduliavimo galia P_{fact} . Ji parenkama atsižvelgiant į naudojamų miltelių lydymosi temperatūrą, šilumos laidumo koeficientą, mikromiltelių grūdelių geometriją. Spinduliavimo galia tiesiogiai lemia kristalizacijos proceso eigą (laiką). Kiekybiškai tai išreiškiama skystosios fazės kiekiu vieno impulso metu. Optimalus skystosios fazės kiekis yra apie 15%, bet negalima perkaitinti medžiagos [6]. SLS technologinio proceso metu metalo dalelių sugerta lazerio spinduliuotes energija esant 3D persiklojimui (1.2) ir pluoštui apeinant 2D kontūrą (1.3):

$$E = \frac{P}{v * H * S}, \quad (1.2)$$

$$E = \frac{P}{v * S}, \quad (1.3)$$

čia: P - lazerio galia [W], v – skenavimo greitis $\left[\frac{m}{s}\right]$, H – pluošto persiklojimas [mm], S - sluoksnio storis [μm].

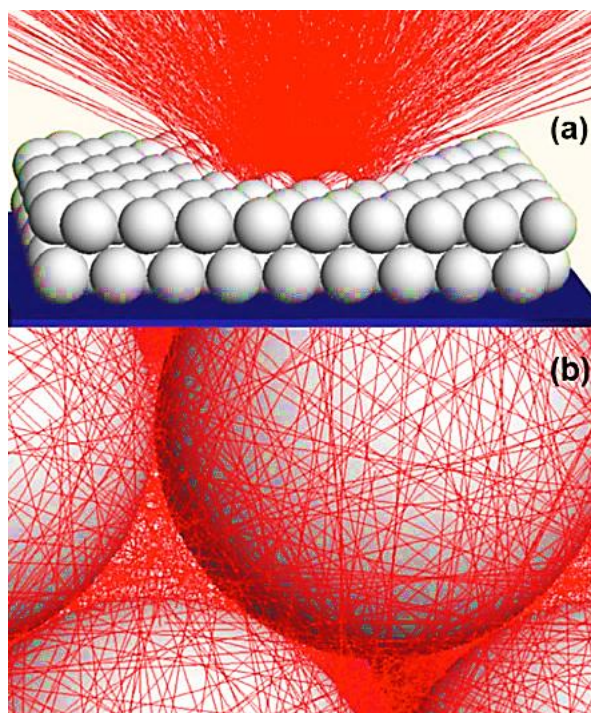


1.10 pav. SLS būdu išlydytų 316L nerūdijančio plieno miltelių gautos struktūros tankio priklausomybė nuo lazerio pluošto energijos tankio [3,4].

Lazerio impulsų pasikartojimo dažnis f . Aktualus jei lazeris dirba impulsinėje veikoje. Dažnis rodo spinduliavimo impulsų, tenkančių vienam miltelių sluoksnio taškui, kiekį, esant tam tikram spindulio judėjimo greičiui, t. y. parodo šiluminės energijos kiekį, kuris buvo įvestas į miltelių sluoksnį. Didinant impulsų dažnį, pasiekiamas tolygus miltelių sluoksnio kaitinimas, kartu sumažėja bandinių įkaitinimo ir atšalimo greičiai [6].

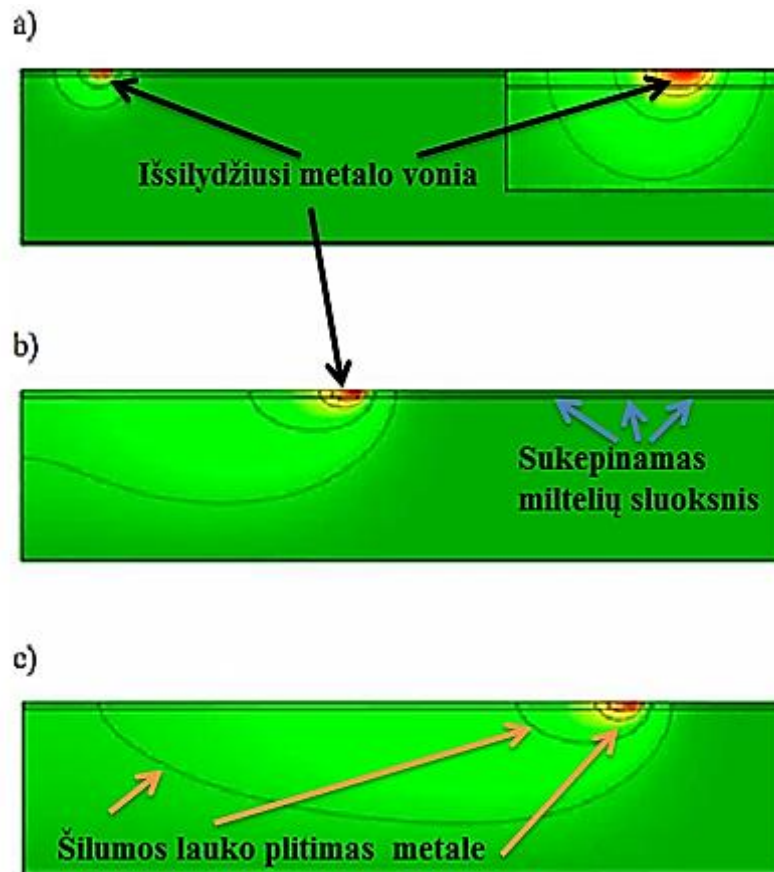
Spindulio judėjimo greitis (skenavimo greitis) v . Jis lemia miltelių plotui (taškui) tenkančios šviesos kiekį. Skenavimo greitis parenkamas atsižvelgiant į medžiagos lydymosi temperatūrą. Sunkiai lydžios medžiagos skenavimo greitis yra mažesnis nei medžiagų su mažesne lydymosi temperatūra. Skenavimo greitis tiesiogiai priklauso nuo sukepinto sluoksnio gylio. Pavyzdžiui, lazerio pluošto judėjimo greičio pokytis nuo 50 iki 150 [mm/s] lemia sukepinto miltelių sluoksnio sumažėjimą nuo 95 iki 50 μm . Taigi, skenavimo greitis yra efektyvus proceso valdymo parametras, nes jį keičiant galima keisti sukepinimo ir kristalizacijos proceso eigą, kas labai veikia bandinių mikrostruktūrą bei gaminio kokybę [6].

Sugerties koeficientas α . Leidžia keisti sukepinimo sluoksnio storį nuo 2 iki 140 μm , kai v yra 50 [mm/s] [6]. Šis parametras priklauso nuo apdirbamos medžiagos poringumo, metalo miltelių cheminės sudėties ir jų gamybos technologijų [6].



1.11 pav. a) ir b) pavaizduota Gauso funkcija aprašomo lazerio pluošto sklaida, kurią sukelia metalo mikrodalelių ir spindulio sąveika [3, 4].

Teisingai parinkus pagrindinius SLS technologinio proceso valdymo parametrus, vyksta nepertraukiamas ir tolygus metalo dalelių sulydymas. Šiuo atveju kiekvienas miltelių paviršiaus taškas gauna vienodą energijos kiekį (taip sukliamas kvazistacionarus sluoksnių formavimasis aplydymo zonoje) [6]. Terminio poveikio zonos šiluminio lauko pasiskirstymo dinamika parodyta 1.12 pav. Lazerio pluošto skenavimo metu, lazerio spinduliui judant miltelių paviršiumi, jie kartu su pagrindu tolygiai kaista, didėja išlydyto metalo tūris, kol pasiekiamas pilnas sulydymo gylis [10]. SLS proceso metu būtina tolygiai sulydyti visą formuojamųjų miltelių sluoksnį, užtikrinant paviršinio sluoksnio (dangos) patvarumą mechaniniam poveikiui. Tai pasiekama įkaitinant substrato paviršių, dėl ko suformuojamos kontakto taškų tarp miltelių ir substrato užuomazgos. Skenavimo procesui pasiekus pusiausvyros būseną (darbinė fazė), sulydymo tarp substrato ir miltelių zona padidėja 20–30% [6].

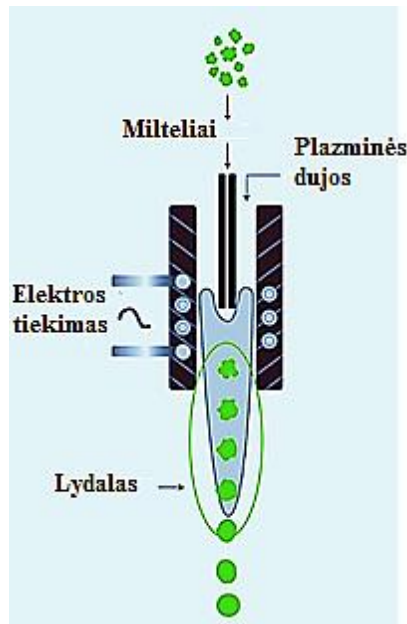


1.12 pav. Šilumos lauko dinamika: pagrindo medžiaga yra vidutinio anglingumo plienas, storis – 1 mm; formuojamųjų miltelių sluoksnio storis – 40 μm ; a), b) ir c) poveikio laikas atitinkamai yra 1, 12, 24 ms, skenavimo greitis yra 0,15 m/s [6].

1.5. Miltelinės medžiagos

Neatsiejama adityvios gamybos dalis yra miltelinės medžiagos. 3D spausdinimui skirtos medžiagos ir jų gamybos technologijos sparčiai vystėsi per paskutinius du dešimtmečius. Vienas iš fizikinių procesų, įtakančių SLS būdu pagamintų prototipų ir gaminių kokybę yra koncentruotos lazerio spinduliuotės ir medžiagos sąveika. Todėl prieš kuriant 3D pramoninius spausdintuvus svarbu apmąstyti iš medžiagotyros pusės, t. y.:

- Įvertinti kokias metalines medžiagas bei jų lydinius bus galima sukepti lazeriu [11, 12, 13].
- Kokio dydžio miltelių intervalą galės sukepti lazeris.
- Miltelinių medžiagų kokybiniai parametrai, pavyzdžiui, dalelių geometrija, prilipę palydovai [14, 15].

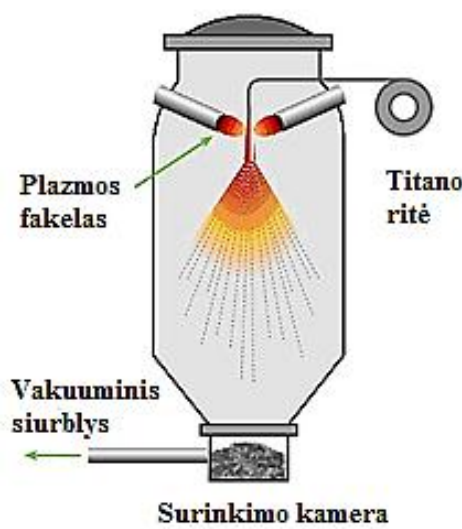
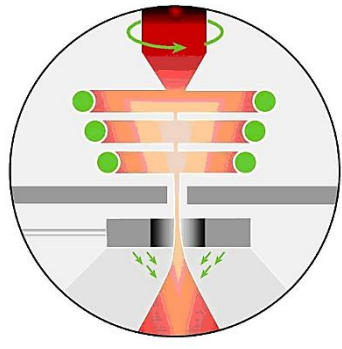


1.13 pav. Metalo miltelių gamyba plazminės sferoidizacijos būdu [16].

SLS gaminių kokybei įtakos turi miltelinėms medžiagoms taikytos gamybos technologijos. Pavyzdžiui, ypač sferinės formos mikrodalelės gaminamos plazminės sferoidizacijos metodu (1.13 pav.). Įvairių formų ir dydžių milteliai yra tiekiami į didelės energijos plazmą ir išpurškiami pro įvairių geometrijų tūtas, priklausomai nuo dalelių specifikos [16]. Gaunamos tankios struktūros ir sferinės geometrijos dalelės. Procesas yra ypač tinkamas sunkiai lydžioms dalelėms gaminti, t.y. Ta, W, Nb bei Mo. Toliau 1.3 lentelėje pateikiami pažangiausi metalo mikrodalelių gamybos būdai.

1.3 lentelė. Tipiniai metalo miltelių gamybos metodai [16].

Dujų atomizavimas	
	<p>Plačiausiai šiuo metu paplitęs miltelių gamybos būdas. Medžiaga yra išlydoma vakuume arba inertinių dujų aplinkoje. Lydalas dideliu greičiu pro tūtą yra išpurškiamas. Gaunamos sferinės dalelės kartais su palydovais. Gaminamos iki 50 mikronų dydžio dalelės. Dažniausiai gaminamos Ni, Co, Fe lydiniai.</p>

Plazminis atomizavimas	
	<p>Ganėtina nauja technologija metalo miltelių gamyboje. Šios technologijos dėka gaunamos beveik ideali sferinė dalelių geometrija. Viela yra tiekiamą į plazmą, kuri atomizuoja metalą. Gaunamos iki 200 mikrometrų dydžio dalelės.</p>
EIGA	
	<p>Faktiškai galima gaminti visus lydinius (ypač tinkamas Ti). Ruošinys yra sukamas ir lydomas indukcinės ritės. Medžiaga šio proceso metu nekontaktuoja su ritėmis. Gaminamos iki 50 mikronų dydžio dalelės. Procesas ekonomiškąs.</p>

Taip pat, yra keli medžiagų mechaninio smulkinimo būdai, tačiau labiausiai paplitę įvairių rūšių malūnai: rutuliniai, planetariniai, išcentriniai, vibraciniai, atritoriniai ir kiti. Atritoriniai yra didelės energijos smulkinamieji aparatai, kuriuos sudaro nejudamas korpusas su maišikliais, perduodančiais judesį būgne esantiems smulkinimo rutuliams [14]. Atritoriuose būgno ašis būna vertikali, nors yra didelės energijos smulkinamųjų aparatų, turinčių horizontalią būgno ašį. Malūne, susidurdama su judančiais rutuliais, medžiaga smulkinama ir trinama. Medžiagos smulkinimo intensyvumas priklauso nuo rutulių judėjimo trajektorijos būgne. Mechaniniais būdais smulkinamos medžiagos [14, 16, 17]:

- metalai ir jų lydiniai,
- keramika,
- polimerinės medžiagos
- oksidai;
- įvairios kitos trapios medžiagos.

Susmulkinimo dispersiškumas priklauso nuo medžiagos rūšies. Pavyzdžiui, molibdeno ir volframo oksidus galima susmulkinti iki 5 nm, o geležį – iki 10-20 nm [14]. Mechaninio smulkinimo porūšis yra mechaninė sintezė arba mechaninis legiravimas, kai smulkinimo proceso metu susmulkinta medžiaga reaguoja viena su kita ir taip gaunama smulkiagrūdė naujos sudėties medžiaga. Šiuo būdu gaunami legiruotųjų lydinių, tarpmetalinių junginių, silicidų, dispersiškai sukietintų kompozicinių medžiagų nanomilteliai, kurių dalelių dydis yra 5-15 nm [14, 18]. Mechaniniai smulkinimo metodai ganėtinai nesudėtingi, paprastos technologijos, galima sparčiai gauti didelius kiekius susmulkintos medžiagos. Prie mechaninio smulkinimo trūkumų reikia paminėti gaminamų miltelių užterštumą malūnų ritiniais ar rutulių medžiaga. Taip pat, sunku gauti vienodų matmenų miltelius. Mechaniniai smulkinimo metodai yra rečiau taikomi 3D spausdinimo medžiagų gamyboje [14, 17, 18].

2. Darbo metodika

Šiame darbe atlikti kompleksiniai SLS selektyvaus lazerinio sukepinimo būdu pagamintų detalių tyrimai. Jų metu buvo:

- naudojant CAD programą sumodeliuoti mėginiai tyrimams,
- nustatyta metalo mikrodalelių cheminė sudėtis EDS metodu,
- atlikta atspausdintų detalių vidinės mikrostruktūros analizė, nustatytas porėtumas, dalelių išsilydimas (miltelių tarpusavio aglomeracija), defektai ir susidarę oksidai gamybos metu,
- ištirta gaminių paviršiaus mikrostruktūra ir paviršiaus šiurkštumas,
- nustatyta mėginių kristalinė sandara.

2.1. Inventor Professional 2018 ir SOLIDWORKS 2018 CAD projektavimo įranga

Lazerių inžinieriai kurdami lazerius, opto-mechatronines judesio sistemų architektūras ar įvairius įrenginius naudoja 3D modelių kūrimo CAD sistemas. Automatizuotas optines sistemas galima maketuoti su „Autodesk Inventor Professional 2018“ ir SOLIDWORKS 2018 3D mechaninio dizaino programa. Ši programinė įranga yra skirta kurti gaminių skaitmeniniam prototipavimui ir išmėginti virtualioje erdvėje [19, 20, 21]. Naudojant šią trimačio modeliavimo programą galima kurti:

- skaitmeninius prototipų 3D modelius,
- detalių ir surinkimo brėžinius bei jų dokumentacijas,
- projektuojamo objekto inžinerinių medžiagų (pavyzdžiui, metalų ir polimerinių medžiagų) tyrimus, tokius kaip atsparumo mechaniniams virpesiams, tempimui, gniuždymui, lenkimui, sukimui bei kitus stipruminius skaičiavimus [19, 20, 21].

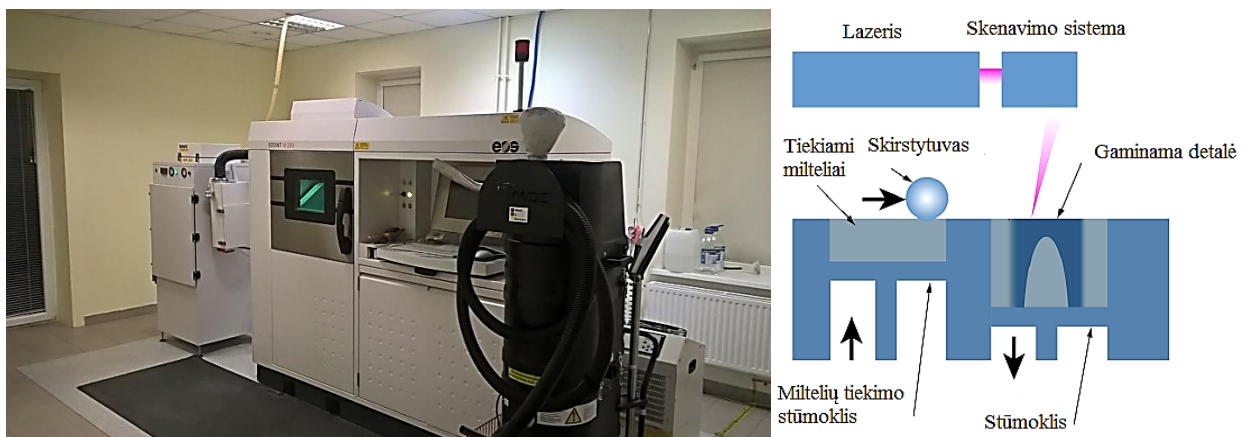
Pagrindiniai privalumai yra:

- Spartus prototipavimas. CAD suteikia galimybę greitai braižyti detales ir jas jungti į mazgus.
- Geras Autodesk Inventor Professional bei SOLIDWORKS programos suderinamumas su pramoninėmis adityviai gamybai naudojamų 3D spausdintuvų programomis. Tai reiškia, kad sumodeliuotas nestandartines detales patogų perkelti į EOS pramoninį spausdintuvą.

Šiame darbe naudojant „Autodesk Inventor Professional 2018“ bei SOLIDWORKS 2018 buvo sumodeliuoti įvairūs detalių dizainai, kurie vėliau įkelti į Materialise Magics programą. Šia programa buvo kuriamos atraminės konstrukcijos sumodeliuotoms CAD detalėms. Jos yra reikalingos tam, kad atspausdinus 3D objektą būtų paprasta jį atskirti nuo platformos, kurioje vyksta spausdinimas.

2.2. Pramoninis EOS EOSINT M280 selektyvaus lazerinio sukepinimo spausdintuvas

Mėginiai, skirti tyrimams, atspausdinti naudojant pramoninę vokiečių kompanijos EOS spausdintuvą. Puikiai tinka tiek prototipų, tiek detalių gamybai. EOS EOSINT M280 selektyvaus lazerinio sukepinimo spausdintuvas puikiai tinka tiek prototipų, tiek detalių gamybai. 3D spausdinimo procesas yra pilnai automatizuotas. Jame yra integruotas 200 W galios šviesolaidinis IPG Photonics kompanijos nuolatinės veikos lazeris, kuris pasižymi puikia pluošto kokybe ($M^2 < 1,05$).



2.1 pav. Pramoninis EOS EOSINT M280 selektyvaus lazerinio sukepinimo spausdintuvas kairėje ir jo principinė schema dešinėje [2, 22].

Šio 3D spausdintuvo gamybos tūris yra 250 mm x 250 mm x 325 mm. Lazerio veikimas yra paremtas Yb legiruota skaidula, kuri emituoja 1030 nm bangos ilgio spinduliuotę. Įmonės SCANLAB AG galvoskenneris gali pasiekti 7 m/s skenavimo greitį. Lazerio pluoštą galima sufokusuoti nuo 100 μm iki 500 μm dydžio dėmę. Proceso metu yra naudojamos inertinės azoto arba argono dujos [22].

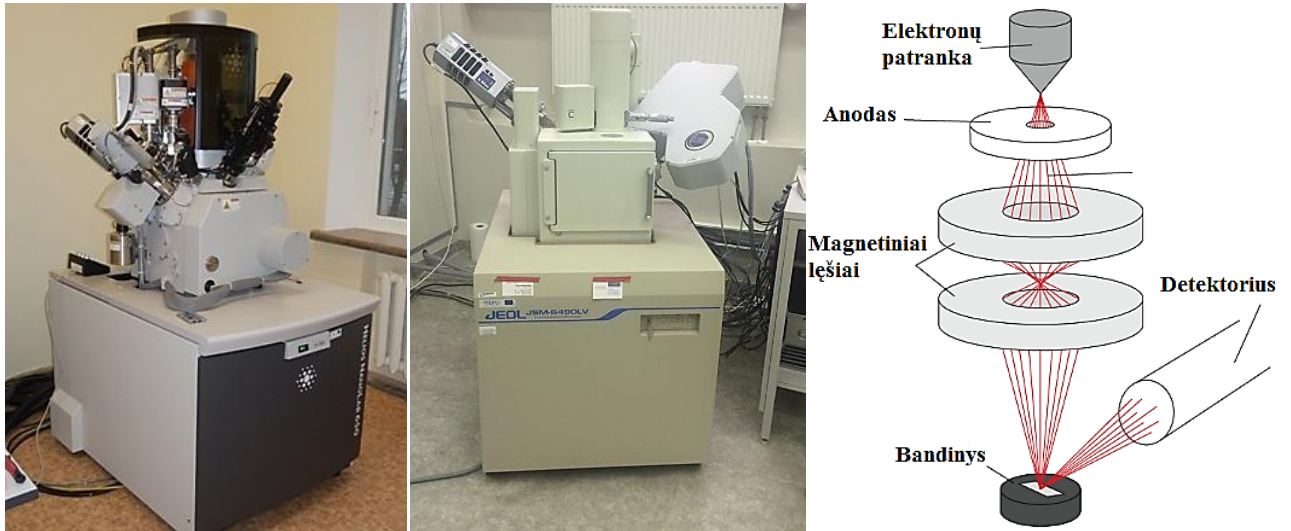
2.1 lentelė. Pramoninio EOS EOSINT M280 3D spausdintuvo techninė dokumentacija [22].

Techninės charakteristikos	
Gamybos erdvė	250 mm x 250 mm x 325 mm
Lazerio tipas	Yb skaidulinis 200 W galios lazeris
Precizinė optika	F-theta lęšis, galvanoskeneris (uždaros grandinės)
Skenavimo greitis	7 m/s
Fokuso diametras	100-500 µm
Maitinimas	32 A
Galios sąnaudos	maksimali 8,5 kW/ tipinė 3,2 kW
Azoto generatorius	integruotas
Suspausto oro tikeimas	7,000 hPa; 20 m ³ /h
Argono tikeimas	4,000 hPa; 100 l/min
Gabaritiniai spausdintuvo matmenys	
Sistema	2,200 mm x 1,070 mm x 2,290 mm
Erdvė, reikalinga spausdintuvui	minimali 4,8 m x 3,6 m x 2,9 m
Spausdintuvo svoris	apie 1,250 kg
Duomenų apdorojimas	
Programinė įranga	EOS RP Tools; EOSTATE Magics RP (Materialise)
CAD sąsaja	STL
Tinklas	Vietinis skaitmeninis tinklas

2.3. Skenuojantys Helios NanoLab 650 ir JEOL JSM-6490LV elektroniniai mikroskopai

Skenuojančios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Fizinių ir technologijos mokslų centre. Elektroninė mikroskopija naudojama tiriant metalų, kristalų, uolienu, betonų kristalinę struktūrą, nustatomi 0,005-1 µm dalelių dydžiai bei cheminė medžiagų analizė [23, 24, 25].

Skenuojamojo elektroninio mikroskopo veikimas pagrįstas sufokusuoto elektronų pluoštelio ir tiriamo paviršiaus sąveika. Toks mikroskopas didina iki 800000 kartų. Elektroniniame mikroskope atvaizdą sukuria greitųjų elektronų srautas, kurį fokusuoja ir nukreipia elektroninis lęšis. Pagrindiniai signalai, kuriuos fiksuoja detektorius, yra atsispindėję elektronai ir antriniai elektronai, t.y. tie, kuriuos įgreitinti skenuojantieji elektronai išplėšia iš paviršiaus. Lyginant su optiniu mikroskopu, skenuojantysis elektroninis mikroskopas leidžia išskirti mažesnes paviršiaus struktūras [23, 24, 25].

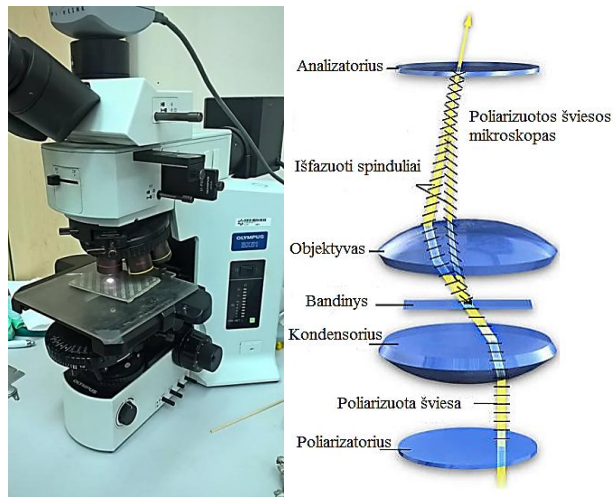


2.2 pav. Atspausdintų gaminių mikrostruktūrų tyrime naudoti skenuojantys elektroniniai mikroskopai: Helios NanoLab 650 ir JEOL JSM-6490LV kairėje bei SEM principinė schema dešinėje [23].

SLS selektyvaus lazerinio sukepinimo būdu pagamintos detalės buvo tirtos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Atspausdinti bandiniai buvo šlifuojami ir poliruojami (paruošti mikrošlifai) tiriant skerspjūvio mikrostruktūrą. Naudojant JEOL JSM-6490LV atlikta mėginių skerspjūvio ir paviršiaus defektoskopinė analizė. Kristalinė sandara nustatyta su Helios NanoLab 650 skenuojančiu elektroniniu mikroskopu.

2.4. Poliarizuotos šviesos mikroskopas Olympus BX51

Poliarizaciniu metodu objektai, pavyzdžiui, mineralai, metalų lydiniai stebimi poliarizuotoje šviesoje (poliarizacinė mikroskopija). Atspausdintų detalių paviršiui bei geometrinius nuokrypius tirti pasirinktas poliarizuotos šviesos optinis Olympus BX51 mikroskopas. Bandinys yra talpinamas tarp poliarizatorių, kurie yra sukryžiuoti ir stebimas poliarizacijos sukimas sukiamas bandinio. Bandiniams stebėti buvo naudojami Nikon 5X objektyvai, kurių optika pagaminta siekiant sumažinti įtempimus medžiagoje [26]. Optinis mikroskopas aprūpintas integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Struktūros ištirtos naudojant 10, 20 ir 50 kartų didinimą.



2.3 pav. Poliarizuotos šviesos mikroskopas Olympus BX51 kairėje ir principinė schema (vaizdo formavimas) dešinėje [26].

Šiuo mikroskopu galima tirti tiek izotropines tiek anizotropines medžiagas, pavyzdžiui, kristalus, polimerus, metalus, keramika [26].

2.5. Optinis profilometras SensoFar PL μ 2300

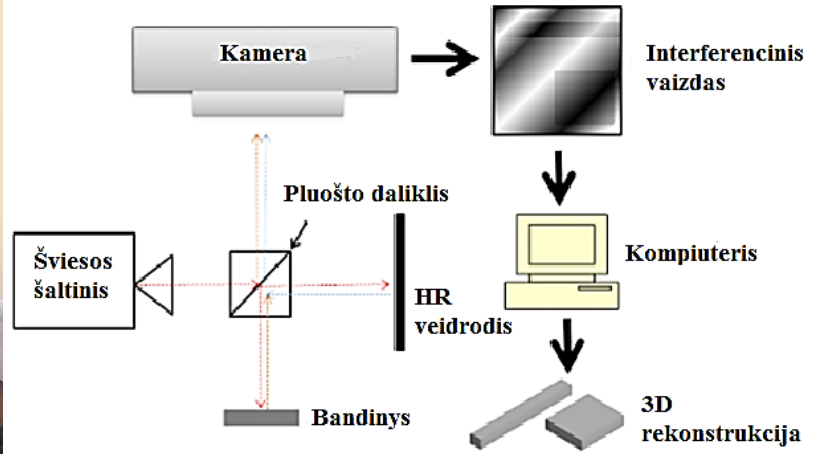
SLS lazerinio sukepinimo būdu pagamintų detalių paviršiaus šiurkščio matavimai atlikti optiniu „SensoFar PL μ 2300“ šiurkštumo profilometru. Šis prietaisas skirtas bandinių topografinėi analizei. Atspausdintų monetų paviršiai prieš tyrimą nebuvo chemiškai ėsdinami ar mechaniškai apdirbami [27].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (2.1)$$

arba

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2.2)$$

čia: R_a – vidutinio profilio nukrypimo reikšmė, y – matuojamas ilgis [27]. Darbe išmatuotos ir palygintos atspausdintų mėginių paviršiaus R_a reikšmės. Gauti duomenys apdoroti, naudojant programinį paketą.



2.3 pav. Optinis profilometras „SensoFar PL μ 2300“ kairėje ir jo principinė schema dešinėje [28].

3. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas

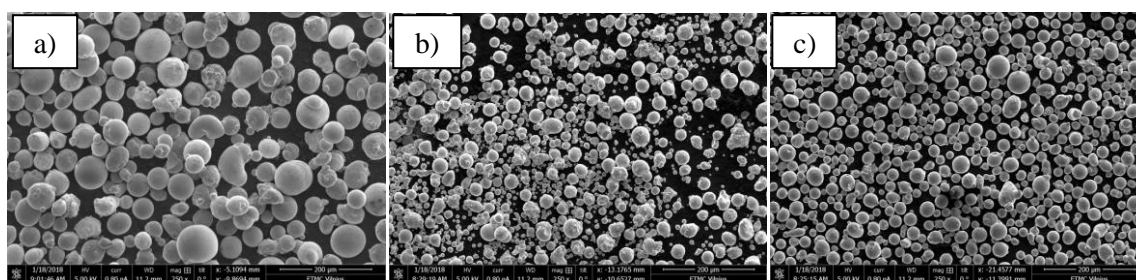
Šiame darbe buvo atspausdintos detalės iš nerūdijančio 316L ir įrankio GP1 plienų bei Co-Cr lydinio MP1 mikromiltelių. Eksperimente 3D objektų formavimui buvo taikomi vienodi technologiniai parametrai, kurie buvo parinkti vadovaujantis vokiečių gamintojo EOS rekomenduojamomis specifikacijomis ir literatūros apžvalga. Atspausdintos 3D struktūros buvo atskirtos nuo gamybinės platformos (atraminių konstrukcijų pašalinimas). Mikrostruktūrų įvertinimas atliktas pasitelkus poliarizuotos šviesos optinių mikroskopų ir SEM. Mėginių paviršiaus šiurkštumui iširti atlikta topografija naudojant optinį profilometrą. Nustatyta atspausdinta 3D gaminių kristalinė sandra.

3.1. Metalo mikrodalelių cheminės sudėties ir dalelių dydžio pasiskirstymo tyrimas

Svarbu žinoti kokia yra metalo mikrodalelių cheminė sudėtis, nes nuo cheminių elementų rūšies priklauso:

- miltelių lydymosi temperatūra,
- šilumos difuzija į gylesnius medžiagos sluoksnius,
- medžiagos atspindys,
- mechaninės ir cheminės savybės [29, 30, 31].

Detalių gamybai naudoti metalo mikromilteliai buvo iširti energetinės dispersijos spektroskopijos (EDS) analize. Dalelių dydžių pasiskirstymas nustatytas SEM.



3.1 pav. SEM vaizdai, naudoti dalelių dydžių dispersijos matavimams: a) 316L, b) MP1, c) GP1 metalo milteliai. Naudotas stebimi per Helios NanoLab 650 SEM.

Iš metalo mikrodalelių dydžių dispersijos tyrimo nustatyta, kad nerūdijančio plieno miltelius (316L) sudaro 20-120 µm dydžio dalelės. Co-Cr lydinio MP1 ir įrankinio plieno GP1 milteliai yra sudaryti iš 10-80 µm dydžio mikrodalelių. Metalų cheminės analizės rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. EDS būdu ištirtų 316L, MP1 ir GP1 metalų mikromiltelių cheminė sudėtis.

Cheminis elementas	EOS 316L	EOS MP1	LPW GP1
Fe	62,1	0,09	73,8
Co	0,13	61,8	0,1
Cr	18,8	29,4	16,0
Ni	13,7	0,01	4,5
Mo	2,84	6,9	-
Nb	-	-	-
C	0,03	-	0,1
Mn	2,1	0,8	0,65
Cu	-	-	4,2
P	-	-	-
S	-	-	-
Si	0,43	0,9	0,77
Al	-	-	-

3.2. SLS proceso technologijų parametrų parinkimas

SLS selektyvusis lazerinis sukepinimas yra terminis procesas. Jis apima miltelių medžiagų kaitimą ir lydymąsi naudojant koncentruotą lazerio spindulį. Lazerinis 3D spausdinimas turi keletą fizikinių parametrų, kurie įtakoja detalių kokybę, t. y. lazerio spinduliuotės sugertis, lazerio pluošto atspindys nuo metalo mikrodalelių, šiluminis laidumas, šiluminė talpa. Dėl metalo miltelių sukeliama lazerio pluošto sklaidos, metalo milteliai daug geriau sugeria spinduliuotę nei mažiau porėtos medžiagos [32, 33]. Tai reiškia, kad spinduliuotė gali patekti į gilesnius sluoksnius (iki anksčiau išlydyto sluoksnio). Tolochko atliko tyrimus su Yb šviesolaidiniu lazeriu, kuris emituoja $\lambda=1030$ nm ilgio spinduliuotę. Pastebėta, kad tankios struktūros titano gabalas tesugeria 30% lazerio spinduliuotės, kai porėtos struktūros iš titano mikromiltelių sugeria 77% spinduliuotės [2, 3]. Selektivaus lazerinio sukepinimo metu metalo milteliai patiria temperatūrinį kitimą. To pasekoje 3D spausdinamoje struktūroje atsiranda liekamieji įtempimai [10]. Dėl vidinių įtempių auginamoje medžiagoje gali atsirasti medžiagos įtrūkimai, dėl ko 3D detalė yra sugadinama. Liekamieji įtempiai gali atskirti objekto sluoksnius, iškraipyti atspausdintos struktūros geometrinius matmenis mechaninio apdirbimo metu (t.y. atskiriant atspausdintą 3D detalę nuo pagrindo platformos). Ypatingai su šia problema susiduria keramikinės medžiagos, nes keramikiniams milteliams sukepti reikia didesnių lazerio intensyvumų nei metalams [34, 35, 36]. Be to, jos prastesnės šilumos laidininkės, todėl susidaro didelis temperatūrinis gradientas.

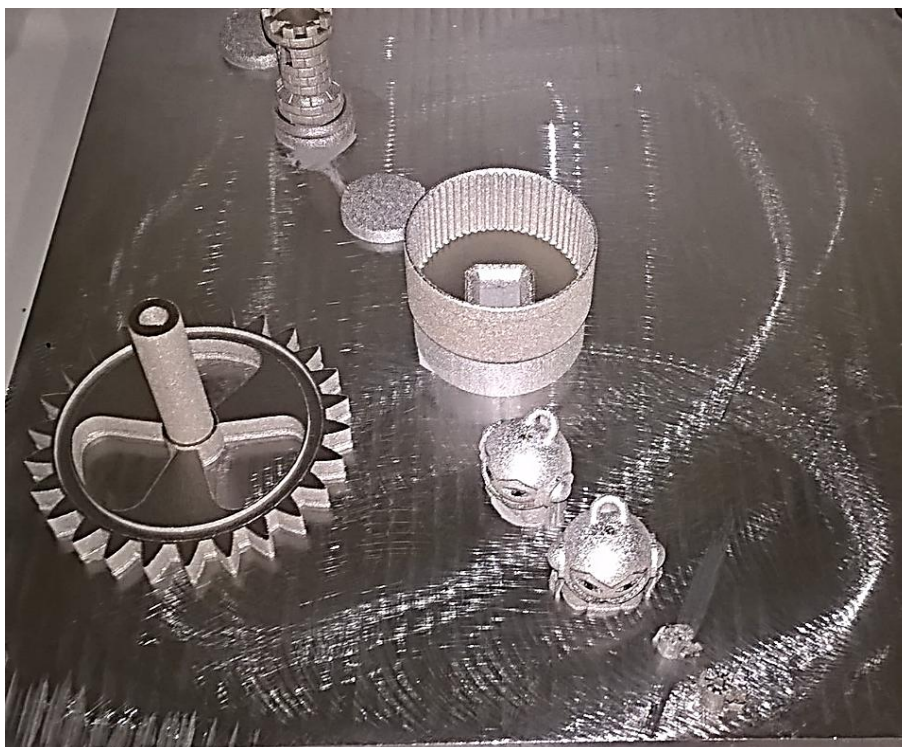
Šiame darbe, naudojant nerūdijančio plieno 316L, įrankinio plieno GP1 ir Co-Cr lydinio MP1 metalo mikromiltelius, buvo atspausdintos monetos formos 3D detalės. SLS proceso technologiniai parametrai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. SLS proceso technologiniai parametrai.

Lazerio galia (nuolatinė veika)	190 W		
Lazerio pluošto diametras sąsmaukoje	100 μm		
Pluošto skenavimo greitis $v_{\text{skenavimo}}$	7 m/s		
Spausdinimui naudojama miltelinė medžiaga	316L	MP1	GP1
Miltelių dydis (atitinkamai 316L, MP1, GP1)	20-120 μm	10-80 μm	10-80 μm
Metalo miltelių sluoksnio storis	40 μm		
Platformos ant kurios spausdinama matmenys	250 mm x 250 mm x 325 mm		
SLS procesui naudojamos inertinės dujos	Azoto dujos		

Po spausdinimo proceso likutiniai milteliai buvo persijojami ir toliau jie bus panaudojami tolesniems spausdinimams. Netinkami milteliai ir jų aglomeracijos susiurbiamos bei utilizuojamos. Po spausdinimo išvalius kamerą, platforma su 3D objektais yra išimama iš kameros. Atspausdintos detalės yra sujungtos su platforma per atramines konstrukcijas. Todėl, norint atskirti adityvios gamybos metodu pagamintas detales nuo pagrindo, jos yra mechaniškai nupjaunamos [37, 38, 39].





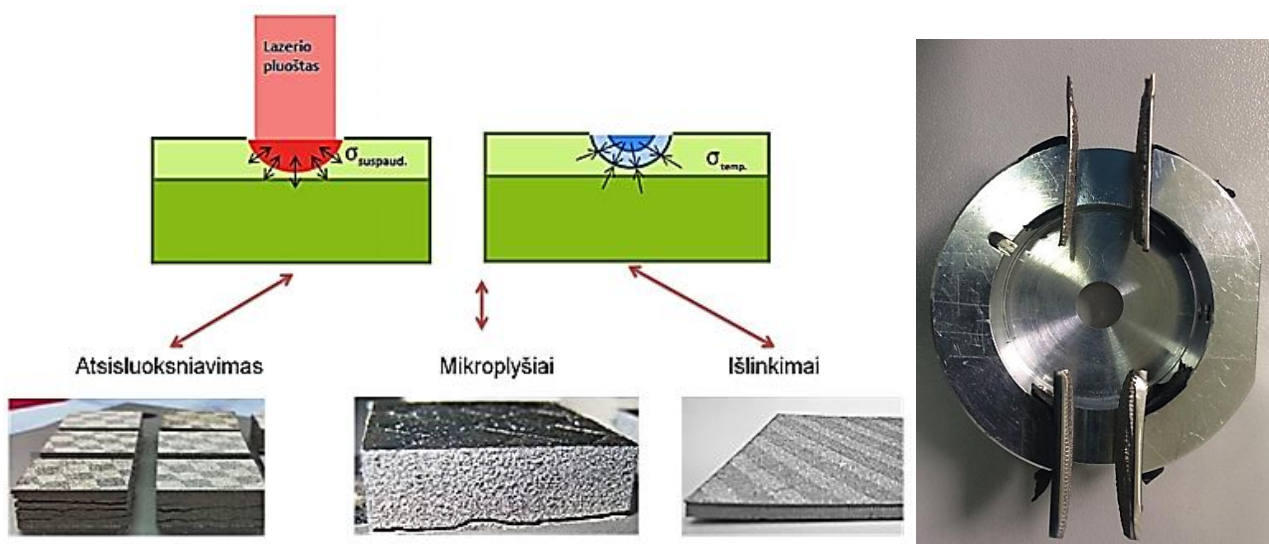
3.2 pav. SLS būdu pagamintos detalių pavyzdžiai ištraukus platformą iš kameros iškart pasibaigus spausdinimo procesui.

Kaip minėta anksčiau dėl lazerio pluošto ir medžiagos sąveikos vyksta medžiagos faziniai virsmai. Todėl medžiagoje atsiranda liekamieji įtempiai. Tokiu būdu kyla rizika atpjaunant 3D struktūrą nuo pagrindo ir toliau kitaip mechaniškai apdirbant (pvz.: šlifuojant) dėl vidinių jėgų poveikio detalė išsikraipo. Tai reiškia, jog sudėtingos struktūros deformacijos paveikta detalė gali prarasti eksploatacines savybes. Dėl to svarbu įvertinti ar pagaminta detalė tenkina iškeltus reikalavimus:

- Mechaninis medžiagos patvarumas (t. y. atspausdintas 3D objektas turi atlaikyti numatytas eksploatacijos metu veikiamas apkrovas ir kitus išorinius veiksnius) [40, 41].
- Pagaminta struktūra turi išlaikyti numatytas fizikines ir chemines savybes.

Taip pat, spausdinimo metu gali iškilti tam tikrų techninių niuansų. Svarbu užtikrinti, kad adityviai gamybai skirta platforma būtų tinkamai sukalibruota spausdinimui. Tai reiškia, kad prieš spausdinimą reikia tinkamai pozicionuoti pagrindą, kad vyktų tolygaus sluoksnio metalo miltelių padengimas. Kitokiu atveju pakrypusi tam tikru kampu platforma gali netolygiai auginti ant padėklo objektus. Be to, miltelių sluoksnį uždedantis peilis iš titano turi būti nenulūžęs ar kitaip deformuotas per visą ilgį, nes kitokiu atveju nebus užtikrinamas tolygaus storio miltelių sluoksnio uždėjimas platformos zonoje. Paruošiant CAD modelį 3D spausdinimui ir modeliuojant jam atramines konstrukcijas, svarbu optimaliai parinkti spausdinamos detalės orientacijos kampą

platformos atžvilgiu, nes kitokiu atveju objektą netolygiai spausdins. Taip pat, svarbu tinkamas metalo miltelių sijojimas. Labai skirtingo dydžio miltelinės dalelės lazerinio sukepinimo proceso metu gali iškreipti 3D struktūros geometriją ir, toliau lipdant vėlesnius sluoksnius, nebeatspausdinti detalės.



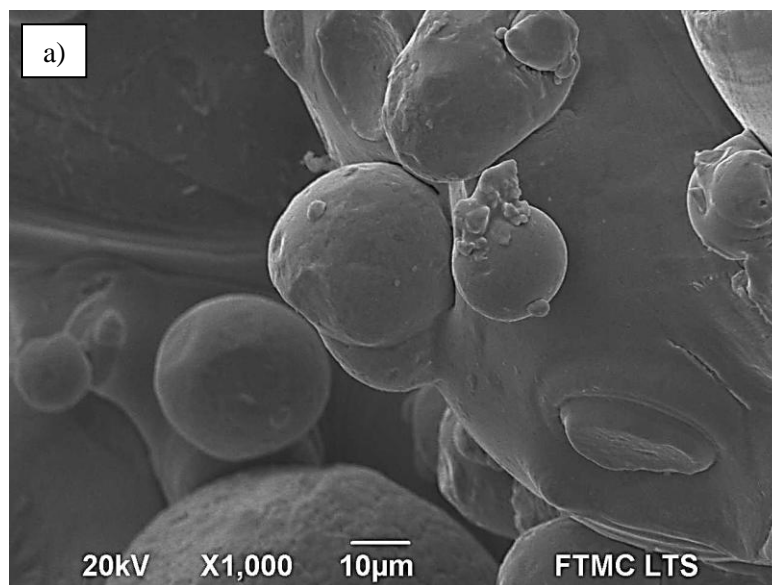
3.3 pav. SLS būdu pagamintų detalių liekamųjų įtampių proceso mechanizmas kairėje [1, 10]. Dešinėje matoma nupjautų monetų nuo gamybinės platformos.

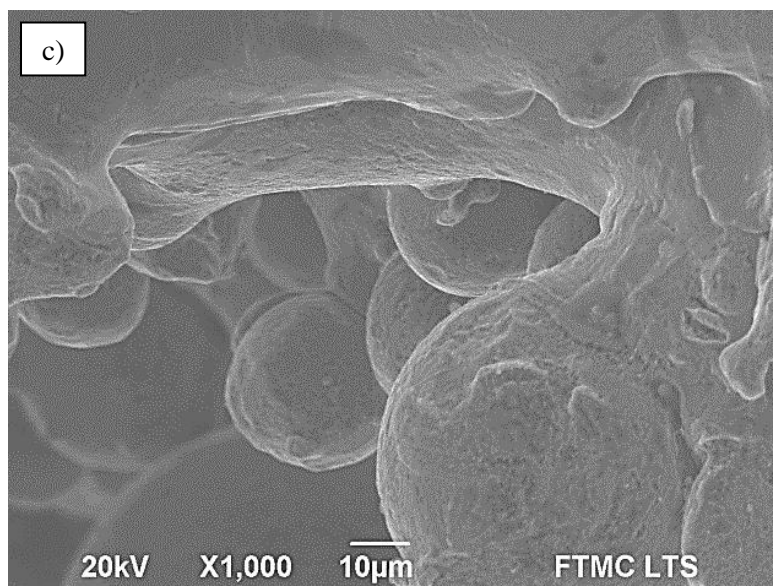
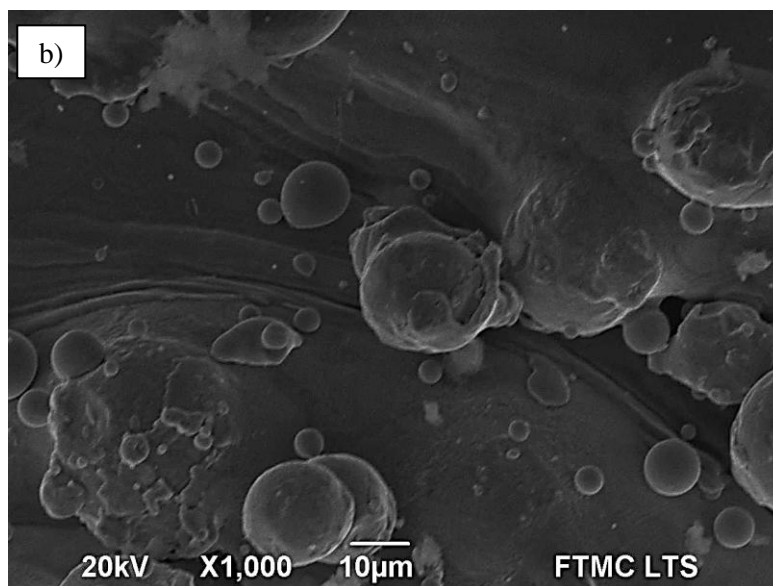
3.3. Atspausdintų mėginių mikrostruktūros tyrimai

3.3.1. Mėginių skerspjūvio mikrostruktūros tyrimai

Išsilydžiusių metalo dalelių mikrostruktūros tyrimai atlikti siekiant nustatyti kokia yra jų forma po jų sukepinimo lazerio pluoštu, struktūra bei sudėtis. Ji priklauso nuo pasirinkto gamybinio režimo ir mikrodalelių cheminės sudėties, kadangi šie išsilydžiusių dalelių parametrai turi įtakos atspausdintos struktūros formavimuisi [42, 43]. Metalo mikrodalelių granulometrijos tyrimais nustatyta, kad visų 15 atspausdintų detalių (5 detalės iš 316L, 5 iš įrankinio plieno GP1, 5 iš Co-Cr lydinio MP1) mikrostruktūra yra panaši, tačiau skiriasi dalelių dydis ir išsilydymo laipsnis. SLS būdu atspausdintos struktūros iš panaudotų skirtingų metalų pasižymi kitokia mikrodalelių tarpusavio aglomeracija. Kai kurios metalo dalelės po lazerinio skenavimo įgavo tam tikrą asferinę formą, o kai kur galima aptikti ir visai neišsilydžiusių mikrodalelių. Pavyzdžiui, keičiant lazerio galią ar skenavimo greitį galima moduluoti 3D struktūros porėtumą (išsilydymo laipsnį) [44, 45]. Iš SEM nuotraukų galime pastebėti, kad dalelių išsilydymui ir tarpusavio sukibimui įtakos turi ne tik taikomi SLS proceso technologiniai parametrai. Kadangi visoms atspausdintoms detalėms iš skirtingų metalų buvo pritaikyti vienodi technologiniai parametrai, kurie pateikti 3.2 lentelėje,

galime teigti, kad 3D mikrostruktūros skirtumai tarp nerūdyjančio 316L, įrankinio GP1 bei Co-Cr lydinio MP1 yra nulemti konkrečiais fizikiniais skirtumais tarp šių medžiagų. Šiuos, atspausdintų gaminių sandaros nevienodumus, lemia metalų baziniai ir legiruojantys cheminiai elementai. 3.1 lentelėje pateikti konkreti cheminės sandūros skirtumas tarp 316L, GP1 ir MP1. Taip pat, visų eksperimentui panaudotų medžiagų dalelių dydžių diapazonas skiriasi. Nerūdyjančiame pliene yra 20-120 μm diametro mikrodalelių, įrankiniame yra 10-80 μm diametro dalelės, o kobalto-chromo metalo dalelių dydžio diapazonas yra toks pat kaip GP1. Tiek nerūdyjančiame 316L, tiek įrankiniame GP1 plienuose daugiausia yra aptinkama geležies (Fe). Atitinkamai šiuose metaluose aptinkamas panašus procentinis kiekis Ni ir Cr, o visi kiti cheminiai elementai tesudaro procento dalį. Geležies lydymosi temperatūra yra 1536 $^{\circ}\text{C}$, kai tuo tarpu kobalto yra 1493 $^{\circ}\text{C}$ [46, 47]. Šios terminės savybės skirtumas leidžia daryti prielaidą, kad norint išlydyti geležies pagrindu turinčius miltelius, jiems reikia daugiau energijos nei kobalto pagrindo lydiniams. Todėl prie parinkto SLS technologinio režimo bendra dalelių išsilydymo tendencija matoma 3.4 paveiksle. Kaip matyti baziniai ir legiruojantys elementai lydosi skirtingais temperatūrų intervalais.

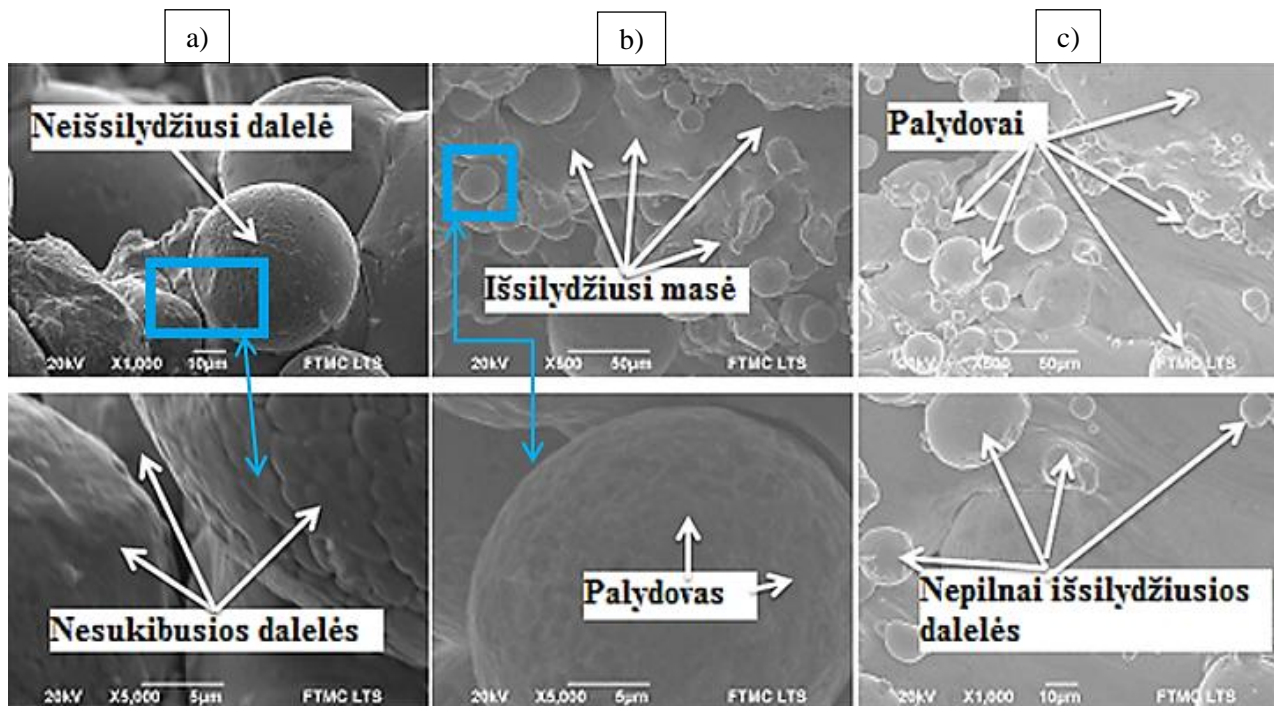




3.4 pav. Detalių iš 316L (a), MP1 (b) ir GP1 (c) porėtos mikrostruktūros vaizdas.

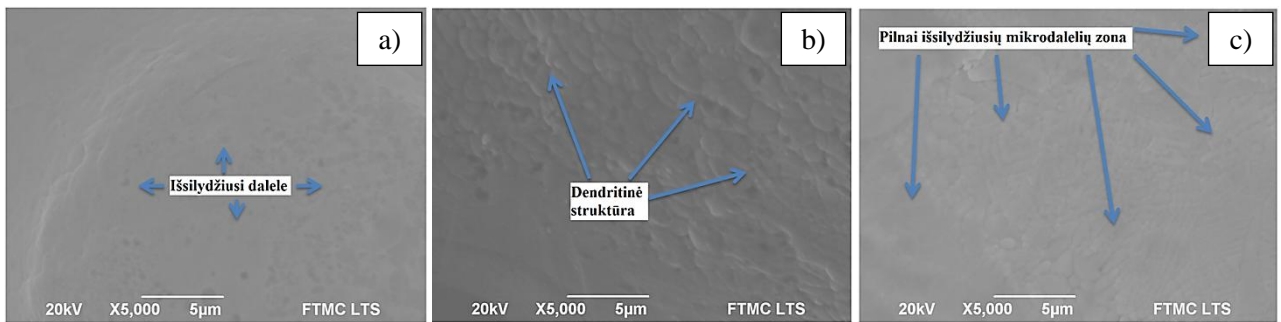
Iš SEM gauto vaizdo galime pastebėti, kad 3.4 pav. a) ir c) nuotraukose (atitinkamai nerūdijančio plieno 316L ir įrankinio plieno GP1 mikromilteliai) kai kuriose zonose metalo dalelės yra nepilnai išsilydžiusios, t.y. įgavusios tam tikrą asferiškumą ar apskritai mažu plotu tesiliečia su gretima išsilydymo zona. Nors tokiu miltelių procentinis kiekis lyginant su išsilydžiusiomis dalelėmis yra labai nedidelis ir siekia iki 3%. Prie terminių medžiagos savybių reikia pabrėžti medžiagos gebėjimą nunešti šilumą į gilesnius sluoksnius. Tai reiškia, kad metalo milteliams sugeriant lazerio pluošta gamybos metu, nuo šios fizikinės savybės priklauso kaip giliai ir kiek dalelės sugebės išsilydyti. Spalvotųjų metalų lydymo Co-Cr cheminiai elementai pasižymi geresniu šiluminiu medžiagos laidumu [46, 47]. MP1 metalo mirkomilteliai efektyviau, t.y. greičiau nei Fe pagrindo medžiagos šilumą nuneša į medžiagos tūrį. Tuomet labiau išsilydžiusios dalelės įgavusios

asferinę formą jungdamosios tarpusavyje sudaro sudėtingą porėtą tūrinę struktūrą. Toks procesas yra analogiškas mikrosuvirinimui. Metalo dalelių geometrija po lazerinio apdirbimo ir mirkoįtrūkių vaizdas pateiktas 3.5 pav.



3.5 pav. Metalų dalelių mikrosuvirinimas: a) nerūdijančio plieno miltelių 316L, b) įrankinio plieno GP1, Co-Cr lydinio MP1 SEM vaizdas. Matomi paviršiaus nelygumai, metalo mikrodalelių tarpusavio aglomeracija, miltelių palydovai, mikrodalelių išsilydymo laipsnis su mikroįtrūkiiais.

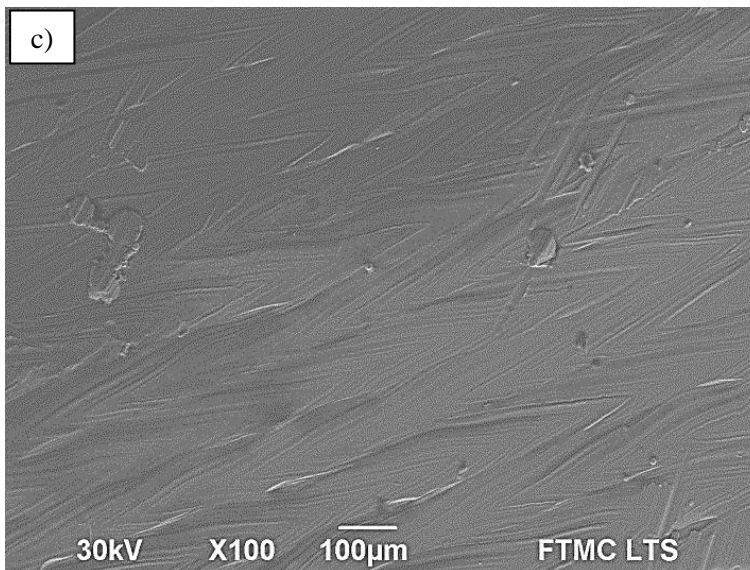
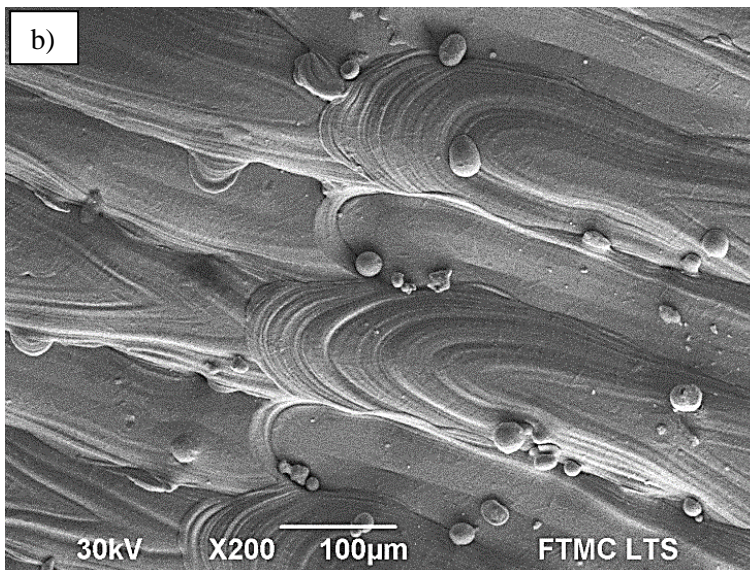
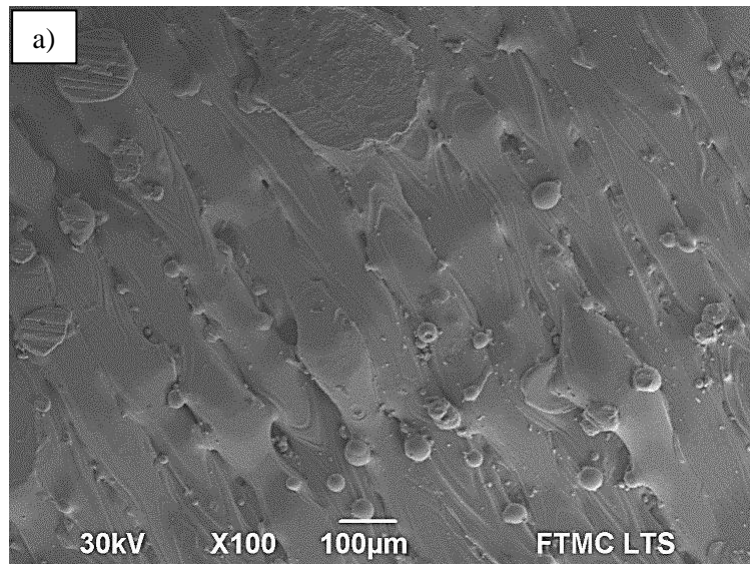
Panaudojant didesnę didinimą, pavyzdžiui, X5000 visose dalelėse aptikta smulki pirminės kristalizacijos struktūros, kurios susidarė išlydytų detalių paviršiuose. Dendritinės struktūros matomos smulkių grūdelių pavidalu, kurios yra aptinkamos metalo mikrodalelių paviršiuose. Taip pat, visose atspausdintose detalėse pastebėtos nevienalytės fazės. Kai kurių dalelių paviršius yra pilnai grūdėtas. Kai kur matyti iš SEM vaizdo, kad yra dalelių su daliniu grūdėtumu. Nevienalytė fazė priklauso taikytų metalo miltelių gamybos technologijų, t. y. dalelių aušimo ir kristalizacijos greičio [48, 49].



3.6 pav. Nerūdijančio plieno 316L (a), įrankinio plieno GP1 (b) ir Co-Cr lydinio MP1 (c) dalelių išsilydimas ir dendritinės mikrostruktūros paviršiuje, kurios susidarė pirminės kristalizacijos metu.

3.3.2. Mėginių paviršiaus mikrostruktūros tyrimai

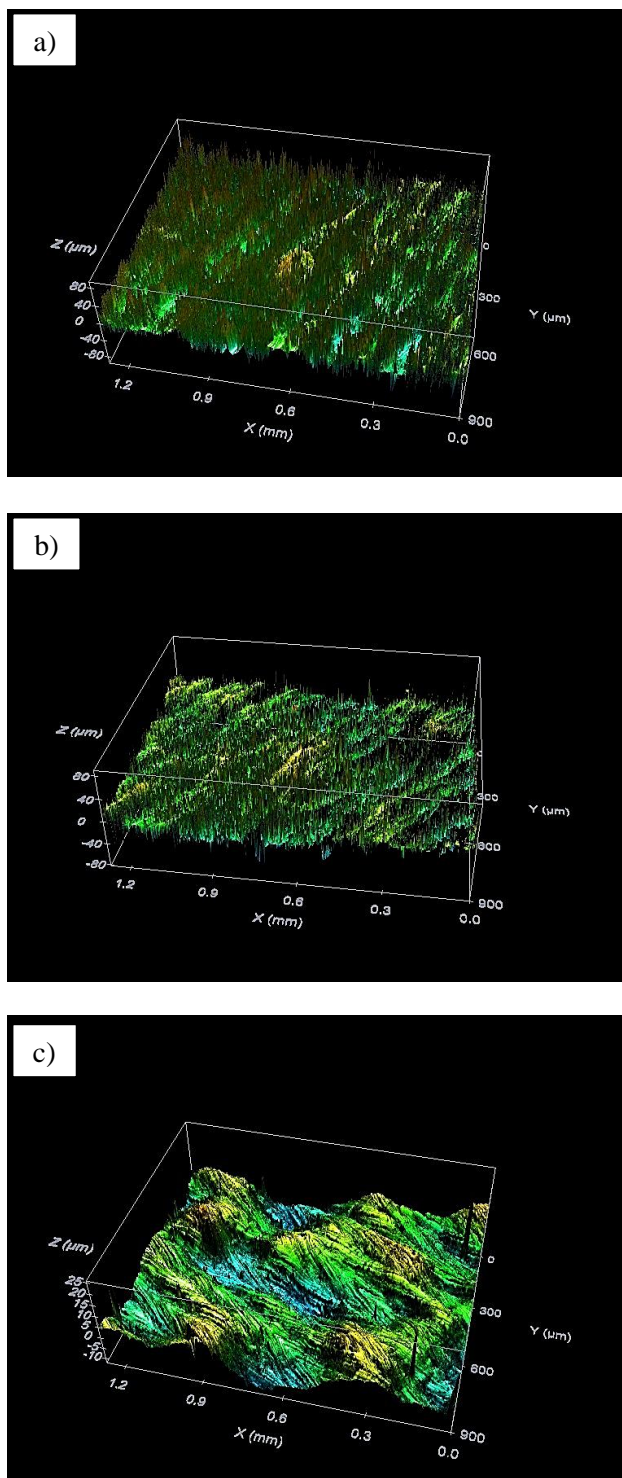
Atspausdintų gaminių paviršiaus struktūra analizuota optinės mikroskopijos ir SEM metodais. Paviršiaus struktūrų rezultatai pateikti 3.7 pav. a), b) ir c). Pateiktose nuotraukose matyti lazerio skenavimo takelių išsidėstymas bei jų tarpusavio sąlyčių linijos. Prie 316L ir GP1 mėginių substrato linijų matoma neišsilydžiusių miltelių ir porų samplaikos. Visos detalės atspausdintos prie to paties lazerio pluošto diametro sąsmaukoje (t.y. 100 μm). Takelių diametras siekia 70-120 μm mėginiuose iš plieno miltelių. Skirtinga metalo miltelių cheminė sudėtis ir struktūra apsunkina ryšių susidarymą tarp dalelių, todėl takeliai per visą jų ilgį stebimi skirtingo pločio. 316L ir GP1 medžiagų lydymosi temperatūra aukštesnė nei MP1. Taip pat, plieninių miltelių šiluminio laidumo koeficientai faktiškai yra dvigubai mažesni savo skaitine reikšme negu MP1 metalų lydinio (33 $\text{W/m}\cdot\text{K}$). Atitinkamai 316L ir GP1 šiluminio laidumo koeficientai yra 16,3 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ir 15,6 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ [46, 47]. Lyginant MP1 su 316L ir GP1 paviršius matyti, kad ganėtinai daug neišbliūskusių dalelių, kurios dangoje matomos apvalios formos. Lyginant 3.7 paveikslėliuose pateiktas paviršiaus nuotraukas matyti, jog medžiagos cheminės sudėtis turi didelę įtaką dangos lamelių formavimuisi. Gaminams iš 316L ir GP1 parinktas spausdinimo režimas buvo netinkamas. Šioms medžiagoms neužteko lazerio galios norint jas geriau išlydyti. Todėl siekiant optimizuoti geležies pagrindu gaminamų detalių kokybę reikia mažinti skenavimo greitį ir/arba didinti pluošto galią. Metalų mikromilteliams iš 316L ir GP1 netinka MP1 gamybos režimas.



3.7 pav. Selektivaus lazerinio sukepinimo būdu (SLS) pagamintų mėginių iš: a) 316L, b) GP1 ir c) MP1 paviršiaus mikrostruktūros vaizdas.

3.3.3. Atspausdintų detalių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai

Paviršiaus šiurkštumas įvertintas šiurkščio parametro Ra – vidutinio aritmetinio profilio nukrypimo [μm] matavimais. Atlikus matavimus pastebėta tendencija, jog vidutinis



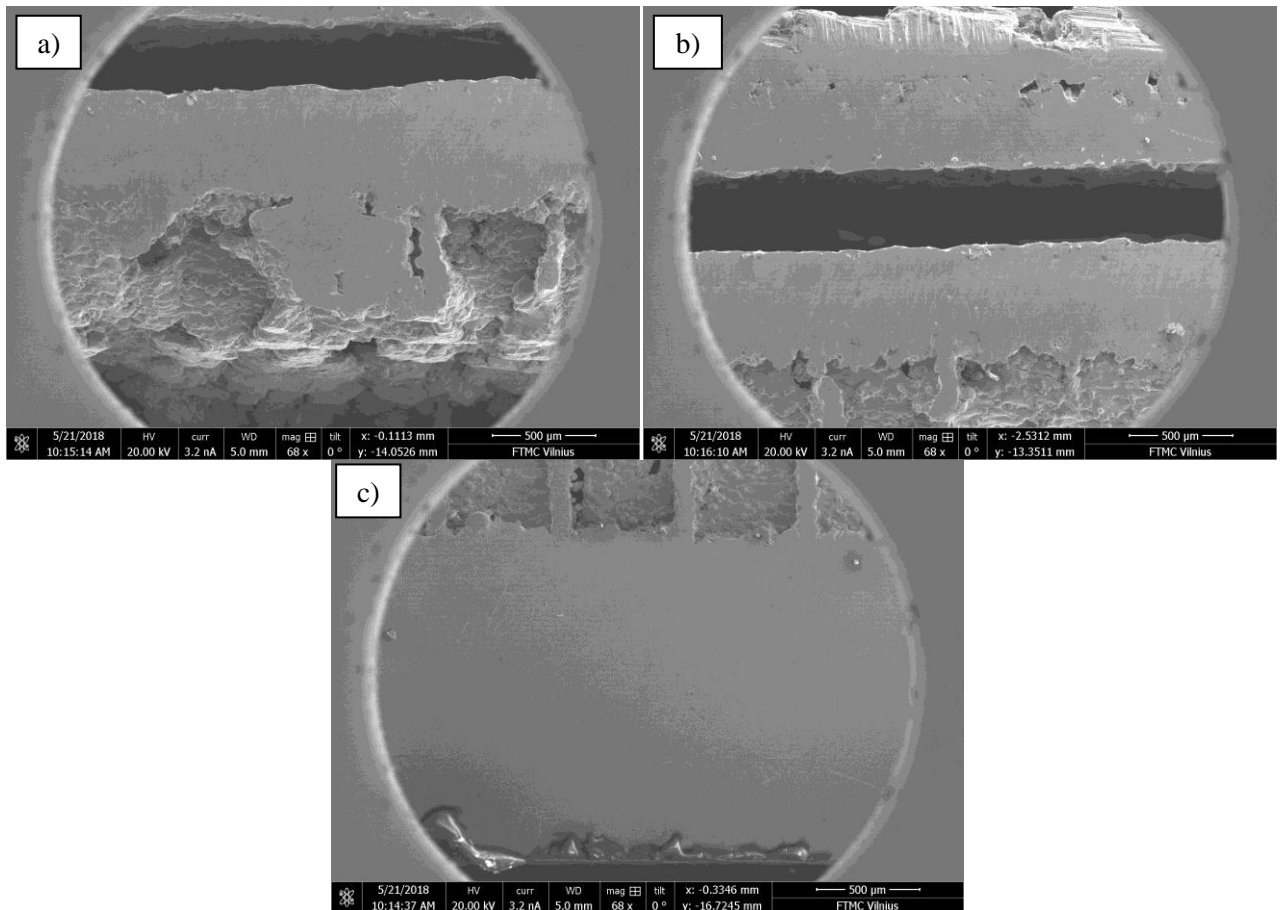
3.8 pav. SLS būdu atspausdintų mėginių: a) nerūdijančio plieno 316L; b) įrankinio plieno GP1 ir c) Co-Cr lydinio MP1 paviršiaus topografija.

aritmetinis profilio nukrypimas mažėja mėginiuose (monetose), kurios metalo mikrodalelės geriau susilydė. Cheminiai elementai, kurie pasižymi geresniu laidumu šilumai, gebėjimo ją kaupti ir mažesniu atspindžio koeficientu geriau sugeria lazerio spinduliuotę [48, 49, 50]. Taip spartinamas procesas, kurio metu išlydyto metalo mikrodalelės efektyviau subliūkšta, danga tampa glotnesnė. Išmatuotos Ra reikšmės varijuoja nuo 3,0 μm iki 13,7 μm Co-Cr ir Fe pagrindo lydiniuose. Didžiausias (13,7 μm) šiurkštis išmatuotas nerūdijančio plieno 316L paviršiuje. Tokį didelį paviršiaus šiurkštį lėmė ir nesubliūškę išlydyto metalo lašeliai. Kiek mažesnė vertė išmatuota GP1 mėginiui (11,4 μm). Visose atspausdintose monetose pastebėta tendencinga paviršiaus šiurkščio priklausomybė nuo miltelių lydymosi temperatūros, cheminių elementų atspindžio koeficiento ir terminio medžiagų laidumo. Mažiausia vertė šiurkštumo vertė gauta MP1 medžiagai (3,0 μm). Tai reiškia, kad parinktas SLS technologinis yra labiausiai tinkamas Co-Cr (MP1) metalo milteliams.

3.3.4. Kristalinės sandaros nustatymas

Paruošti mėginių skerspjūvio mikrošlifai (žiūrėti 3.9 pav.). Bandiniai buvo šlifuojami ir poliruojami skirtingo šiurkštumo popieriais siekiant išgauti kuo lygesnį paviršių. Neišsilydžiusios metalo mikrodalelės buvo pašalintos ultragarsiniu valymu. Siekiant išskirti metalo kristalus reikėjo atlikti metalų ėsdinimą. Tam buvo panaudota 1% druskos rūgštis (HCl). Metalai yra neskaidrūs kūnai, todėl apie jų kristalinę sandarą sprendžiama pagal atspindį (šviesos arba elektronų). Ruošiant mikrošlifą (t. y. šlifuojant ir poliruojant) buvo stengtasi išvengti likutinių įbrėžimų ar duobučių [51]. Mikrostruktūros išryškinimo ėsdinant šlifuoatą, poliruotą paviršių cheminiu reaktyvu esmė ta, kad reaktyvas nevienodai intensyviai reaguoja su metalo struktūros grūdeliais ir jų ribomis su skirtingomis lydinių struktūrinėmis dedamosiomis [51, 52].

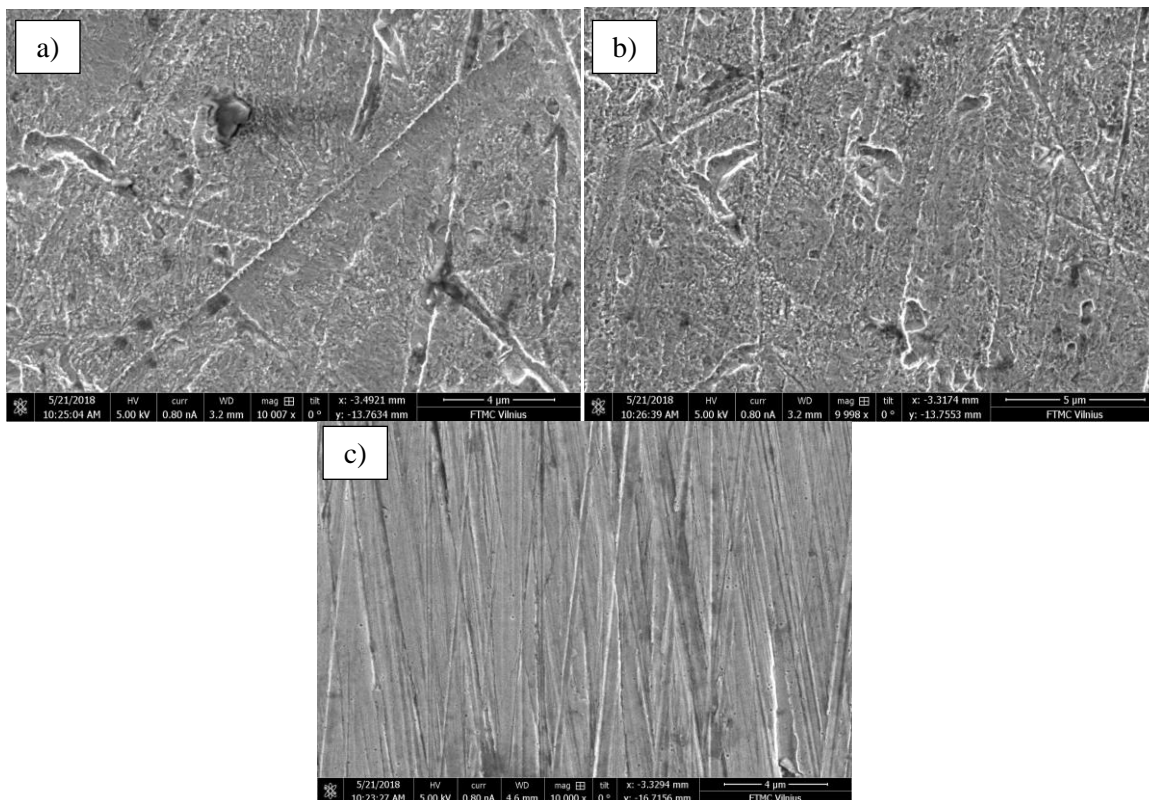
Mikrošlifai parodė, kad 316L ir GP1 mėginiams būdinga smulkiagrūdė, įvairiai orientuota kristalinė struktūra. Pagal 316L, GP1 cheminę mikrodalelių sudėtį bei SLS gamybos sąlygas, palanku atspausdintose detalėse susidaryti martensitinei kristalinei sandarai. Martensito kristalai auga tik austenito grūdeliuose, nekirsdami grūdelių ribų. Dėl to martensito adatėlių matmenis nulemia austenito grūdelių dydis [51, 52]. 316L ir GP1 pliene martensito plokštelės yra smulkios (t. y. nanometrų dydžio), todėl didinant 100-500X, pavyzdžiui, optiniu mikroskopu, martensito grūdelių išskirti nepavyko. Mažaangliniuose 316L ir GP1 plienuose nustatytas masyvusis martensitas. Šio tipo kristalai sudaro lygiagrečių plokštelių paketus. Iš 3.10 paveikslėlio matyti, kad viename austenito grūde gali susidaryti keli skirtingai orientuoti martensito plokštelių paketai.



3.9 pav. Atspausdintų mėginių paruoštas skerspjūvio mikrošlifas: a) 316L; b) viršuje GP1 ir apačioje MP1; c) MP1.

Tokios kristalinės sudėties medžiagos pasižymi ~ 60-70 HRC (kietumas pagal Rokvelą). Ji yra pati kietiausia smulkiagrūdė plieno struktūra. Fundamentinė priežastis yra ta, kad virsmas prasideda, kuomet anglies difuzija austenite jau nebevyksta. Anglies atomai negali išsiskirti iš austenito kristalinės gardelės. Martensitinio virsmo eigoje γ -geležies kristalinė gardelė keičiasi į α -geležies kristalinę gardelę, anglies atomai, esantys γ -geležies gardelėje, lieka ir α -geležies gardelėje. Šio virsmo produktas yra martensitas [51]. Tai persotintas kietas anglies tirpalas α -geležyje. Anglies atomai iškreipia α -geležies kristalinę gardelę. Buvusi kūbinė gardelė fazinio proceso metu virsta tetragoninę [51]. Martensitui susidaryti nereikia izoterminių sąlygų. Martensito kristalai yra plokštelių formos. Kadangi mikrošlifo plokštuma šias plokšteles kerta skirtingais kampais, todėl mikroskopo stebėjimo lauke jo kristalai yra adatėlių formos (3.10 pav.). Neišvengta šlifavimo ir poliravimo defektų. Paveikslėlyje matoma, kad visų atspausdintų mėginių (316L, GP1, MP1) skerspjūvio mikrošlifuose matomos poros ir įvairūs mikroįtrūkiai. Taip pat, ant mikrošlifo paviršiaus pastebėti vertikalūs, horizontalūs ir įvairiais kampais orientuoti skirtingų diametru takeliai. Tai yra paviršiaus įbrėžimai šlifavimo ir poliravimo metu. Co-Cr miltelių pagrindo

gaminiuose (MP1) nepastebėta jokio grūdėtumo. Matomi tik vertikalūs šlifavimo defektai ir retai išsidėsčiusios poros.



3.10 pav. Gaminių kristalinės struktūros analizė: a) 316L ir b) GP1 nustatyta martensitinė plieno struktūra. Detalėje iš MP1 (žiūrėti c) paveikslėly) nepastebėta grūdėtumo.

Išvados

1. Naudojant SEM-EDS įrangą nustatyta 316L, GP1, MP1 miltelių cheminė sudėtis. 316L ir GP1 miltelių pagrindą sudaro Fe (atitinkamai 62,1% ir 73,8%). Anglies C aptikta (316L-0,03% ir GP1-0,1%). Metalų lydynį MP1 pagrinde sudaro Co 61,8%, Cr 29,4 %. Dalelių dydžių dispersijos matavimų rezultatai: 316L milteliai sudaryti iš 20-120 μm , GP1 ir MP1 iš 10-80 μm .
2. Pagal CAD brėžinius buvo atspausdinta 15 mėginių iš 316L, GP1, MP1 miltelių. SLS gamybai buvo parinkti parametrai: lazerio galia 190 W, skenavimo greitis 7 m/s, pluošto diametras sąsmaukoje 100 μm , miltelių sluoksnio storis 40 μm .
3. Atlikti mėginių mikrostruktūros tyrimai. Nustatyta, kad mažiausiai paviršiaus defektų turėjo mėginiai iš MP1 miltelių. Paviršiai iš 316L ir GP1 pasižymėjo neišlydytų dalelių zonomis. Paviršiaus šiurkštumas mėginiams 316L, GP1, MP1 atitinkamai sudarė $Ra=13,7 \mu\text{m}$; 11,4 μm ; 3,0 μm . Skerpsjūvio mikrošlifas parodė, kad metalo mėginiams iš 316L ir GP1 būdingi mikroįtrūkimai 5 – 70 μm ilgio diapazone. Taip pat, 316L ir GP1 stebėta martensitinė plieno struktūra. Mėginiai iš MP1 pasižymėjo monolitinė struktūra, t.y. nepastebėta grūdėtumo.

Literatūros sąrašas

- [1] O. Balachinaitė, A. Bargelis, A. Dementjev, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
- [2] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh and S. L. Sing, Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews* **2**(4), 041101 (2015).
- [3] W. E. King, A. T. Anderson, M. Ferencz, N. E. Hodge, C. Kamath, S. A. Khairallah and A. M. Rubenchik, Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges, *Applied Physics Reviews* **2**, 041304 (2015).
- [4] H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **83**, 389–405 (2016).
- [5] G. Vaitkūnaitė, V. Markovič, O. Černašėjus, Selektivityvoju lazerinio su kepinimo būdu su kepintų geležies pagrindo miltelių paviršiaus lazerinio mikroapdirbimo tyrimai, *Mechanics, Material science, Industrial Engineering and Management* **6**, 661-665 (2014).
- [6] V. Markovič, O. Černašėjus, V. Prokopovič, Lazerinės miltelių sukepinimo technologijos analizė, *Mechanics, material science, industrial engineering and management* **5**(6), 676-679 (2013).
- [7] <https://www.qioptiq-shop.com/en/Precision-Optics/LINOS-Laseroptics-Lenses/LINOS-F-Theta-Ronar-Lenses/Technical-annotations-F-Theta-Ronar/> (stebėta 2017 12 26).
- [8] <http://www.rsoptics.com/en/proshow.asp?id=694> (stebėta 2018 01 19).
- [9] C. Yana, L. Haoa, A. Husseina, S. L. Bubbc, P. Younga, D. Raymont, Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular latticestructures fabricated via direct metal laser sintering, *Journal of Materials Processing Technology* **214**, 856–864 (2014).
- [10] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz, Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V, *Materials Science & Engineering: A* **712**, 175-187 (2018).
- [11] A. V. Valiulis, *Welding and Thermal Cutting. An Introduction* (VGTU leidykla „Technika“, Vilnius, 2008).
- [12] A. Naujokaitis, *Medžiagų mokslas* (VGTU leidykla „Technika“, Vilnius, 2009).
- [13] U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Klingus, F. Naher, S. Oesterle, H. Paetzold, A. Stephan, *Mechanikos inžinieriaus žinynas*, 1-moji laida lietuvių kalba (Lietuvos inžinerinės pramonės asociacija LINPRA, Kaunas, 2014).
- [14] A. V. Valiulis, *Naujos medžiagos* (VGTU leidykla „Technika“, Vilnius, 2005).
- [15] R. Jonušas, J. Kalpokas, P. Lazaravičius, V. Jankauskas, *Koncentruotos energijos metodų taikymas apdirbant medžiagas* (Leidykla „Technologija“, Kaunas, 2004).

- [17] A. V. Valiulis, *Šiuolaikiškos inžinerinės medžiagos. Kūrimas ir taikymas* (VGTU leidykla TECHNIKA, Vilnius, 2010).
- [18] A. V. Valiulis, *Pažangios inžinerinės medžiagos: savybės, gamyba ir taikymas* (VGTU leidykla TECHNIKA, Vilnius, 2012).
- [19] V. Vekteris, A. Kasparaitis, S. Kaušinis, R. Kanapėnas, *Matavimų teorija ir praktika* („Žiburio leidykla“, Vilnius, 2000).
- [16] <https://www.lpwtechnology.com/technical-library/powder-production> (stebėta 2018 01 26).
- [22] https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280 (stebėta 2018 01 26).
- [20] <https://launch.solidworks.com> (stebėta 2018 02 12).
- [21] <https://www.autodesk.com/products/inventor/free-trial> (stebėta 2018 03 03).
- [23] <https://www.eng-atoms.msm.cam.ac.uk/RoyalSocDemos/SEM> (stebėta 2018 03 25).
- [24] A. Kičaitė, *Medžiagotyra. Statybinės medžiagos* (VGTU leidykla TECHNIKA, Vilnius, 2009).
- [25] P. Ambroza, L. Kavaliauskienė, *Medžiagų sandaros ir savybių tyrimas* (KTU leidykla TECHNIKA, Kaunas, 2012).
- [26] <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/livecellimaging/techniques.html> (stebėta 2018 05 19).
- [27] Z. Rimkevičienė, P. Gerdžiūnas, V. Lemkė, V. Plakys, V. Vilkevič, *Inžinerinė grafika mašinu gamyboje* (VGTU leidykla TECHNIKA, Vilnius, 2011).
- [28] <https://www.nanoscience.com/technology/optical-profiler-technology/how-profilometer-works/> (stebėta 2018 05 12).
- [29] E. Kibirkštis, V. Miliūnas, *Valdomų savybių išmaniosios medžiagos ir nanotechnologijos* (KTU leidykla TECHNIKA, Kaunas, 2016).
- [30] S. A. Khairallah, A. T. Anderson, A. Rubenchik, W. E. King, Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones, *Acta Materialia* **108**, 36-45 (2016).
- [31] A. Simchi, Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features, *Materials Science and Engineering: A* **428**(1-2), 148–158 (2006).
- [32] F. Shen, S. Yuan, C. K. Chua, K. Zhou, Development of process efficiency maps for selective laser sintering of polymeric composite powders: Modeling and experimental testing, *Journal of Materials Processing Technology* **254**, 52-59 (2018).
- [33] A. Y. Alfaify, J. Hughes, K. Ridgway, Critical evaluation of the pulsed selective laser melting process when fabricating Ti64 parts using a range of particle size distributions, *Additive Manufacturing* **19**, 197-204 (2018).

- [34] S. A. M. Tofail, E. P.Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, C. Charitidis, Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *materialstoday* **21**(1), 22-37 (2018).
- [35] A. Danezana, G. Delaizirab, N. Tessier-Doyenb, G. Gasgnierc, J. M. Gaillarda, P. Duporta, B. Nait-Ali, Selective laser sintering of porcelain, *Journal of the European Ceramic Society* **38**(2), 769-775 (2018).
- [36] H. H. Alsalla, C. Smith, L. Hao, Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel, *Rapid Prototyping Journal* **24**(1), 9-17 (2018).
- [37] B. AlMangour, D. Grzesiak, T. Borkarc, J.-M.Yangd, Densification behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of TiC/316L stainless steel nanocomposites fabricated by selective laser melting, *Materials & Design* **138**, 119-128 (2018).
- [38] M. Sabelle, M. Walczak, J. Ramos-Grezab, Scanning pattern angle effect on the resulting properties of selective laser sintered monolayers of Cu-Sn-Ni powder, *Optics and Lasers in Engineering* **100**, 1-8 (2018).
- [39] B. Farber, K. A. Small, C. Allen, R. J. Causton, A. Nichols, J. Simbolick, M. L. Taheri, Correlation of mechanical properties to microstructure in Inconel 718 fabricated by Direct Metal Laser Sintering, *Materials Science & Engineering: A* **712**, 539-547 (2018).
- [40] J. B. Gao, X. L. Zhao, J. K.Yue, M. C. Qi, D. L. Zhang, Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Samples Fabricated by Selective Laser Melting, *Titanium Powder Metallurgy and Additive Manufacturing* **770**, 179-186 (2018).
- [41] D. Dai, D. Gu, H. Zhang, J. Xiong, C.Ma, C. Hong, R. Poprawe, Influence of scan strategy and molten pool configuration on microstructures and tensile properties of selective laser melting additive manufactured aluminum based parts, *Optics & Laser Technology* **99**, 91-100 (2018).
- [42] H. Asgari, M. Mohammadi, Microstructure and mechanical properties of stainless steel CX manufactured by Direct Metal Laser Sintering, *Materials Science & Engineering: A* **709**, 82-89 (2018).
- [43] M. Ghasri-Khouzani, H. Peng, R. Attardo, P. Ostiguy, J. Neidig, R. Billo, D. Hoelzle M. R. Shankar, Direct metal laser-sintered stainless steel: comparison of microstructure and hardness between different planes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **95**(9-12), 4031-4037 (2018).
- [44] A. Keshavarzkermani, M. Sadowsk, L. Ladani, Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation, *Journal of Alloys and Compounds* **736**, 297-305 (2018).

- [45] N. Kang, W. Ma, F. Li, H. Liao, M. Liu, C. Coddet, Microstructure and wear properties of selective laser melted WC reinforced 18Ni-300 steel matrix composite, *Vacuum* 69-74 (2018).
- [46] L. C. Wei, L. E. Ehrlich, M. J. Powell-Palm, C. Montgomery, J. Beuth, J. A. Malen, Thermal conductivity of metal powders for powder bed additive manufacturing, *Additive Manufacturing* **21**, 201-208 (2018).
- [47] KV Sudhakar, P. Rawn, R. Coguill, S. Coguill, T. Winsor and Bruce Madigan, Mechanical Properties and Microstructure Evaluation of Biomaterial Grade 316L Stainless Steel Produced by Additive Manufacturing, *European Journal of Advances in Engineering and Technology* **5**(2), 106-112 (2018).
- [48] H. Fayazfar, M. Salarian, A. Rogalsky, D. Sarker, P. Russo, V. Paserin, E. Toyserkani, A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties, *Materials & Design* **144**, 98-128 (2018).
- [49] D. Kong, X. Ni, C. Dong, X. Lei, L. Zhang, C. Man, J. Yao, X. Cheng, X. Li, Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Materials & Design* **152**, 88-101 (2018).
- [50] L. Ardelean, L.-C. Rusu, L. Reclaru, Laser Sintering Technology for Co-Cr alloys, *International Poster Journal of Dentistry and Oral Medicine* **15**(1), 635 (2013).
- [51] V. Juodelis, J. Bendikas, A. V. Valiulis, *Metalotyros pagrindai* (VGTU leidykla TECHNIKA, Vilnius, 2004).
- [52] R. Tomašiūnas, *Šiuolaikinės mikroskopijos metodai medžiagotyrai* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).

Rezultatų viešinimas

Publikacijos, susijusios su autoriaus darbo rezultatais:

[*] G. Mordas, S. M. Jankus, R. Travkin, M. Gaspariūnas, V. Jasulaitienė, A. Selskis, R. Juškėnas, V. Remeikis and G. Račiukaitis, Characterization and performance of the metal powders for additive manufacturing, materials **11**, (2018).

Santrauka lietuvių kalba

SLS ATSPAUSDINTŲ DETALIŲ MIKROSTRUKTŪROS TYRIMAI

Simonas Mindaugas Jankus

Šio darbo tikslas buvo ištirti selektyviu lazerinio sukepinimo būdu (SLS) pagamintų detalių iš 316L, GP1 ir MP1 miltelių įtaką mikrostruktūrai. SEM-EDS nustatyta naudojamų medžiagų cheminė sudėtis ir miltelių dydžių diapazonas. Mėginių gamybai buvo naudojamas EOS EOSINT M280 lazerinio sukepinimo įrenginys. Metalų mikromiltelius sukepinimo nuolatinės veikos Yb skaidulinis lazeris (1030 nm), skenavimo greitis buvo 7 m/s, miltelių sluoksnio storis 40 μm. Gamybai naudotos inertinės azoto dujos. Pagamintų mėginių skerspjūvio ir paviršiaus mikrostruktūra buvo ištirta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Atspausdintų mėginių paviršiaus šiurkštis išmatuotas optiniu profilometru. Paruošus gaminių mikrošlifą stebėta kristalinė metalų struktūra.

Tyrimų metu pastebėta, kad mėginiai iš 316L, GP1 pasižymėjo didesniu defektų kiekiu lyginant atspausdintas detales iš MP1 miltelių. Iš SEM nustatyta, kad geležies pagrindu detalės 316L, GP1 metalo mikrodalelės blogiau išsilydė, mėginiuose matyti 5-70 μm įtrūkiai ir poros. Prastesnė plieninių detalių 3D spausdinimo kokybę įtakojo netinkamas gamybos režimas. 316L ir GP1 milteliams nepakako lazerio energijos, kad dalelės tarpusavyje geriau susivirintų, jų lydymosi temperatūra aukštesnė ir šilumos laidumas yra prastesnis nei Co-Cr lydinio MP1. Tą kiekybiškai apibūdina mėginių paviršiaus šiurkščio matavimai. Paviršiaus šiurkštumas mėginiams 316L, GP1, MP1 atitinkamai sudarė $R_a = 13,715 \mu\text{m}$; $11,412 \mu\text{m}$; $3,006 \mu\text{m}$.

Kristalinei metalų sandarai nustatyti buvo paruošti 316L, GP1, MP1 mėginių mikrošlifai. Bandinių skerspjūvio paviršiai buvo mechaniškai šlifuojami ir poliruojami. Ėsdinami druskos rūgštimi (HCl). Nerūdijančio plieno 316L ir įrankinio plieno GP1 detalėse aptikta smulkiagrūdė martensitinė struktūra. Mėginiai iš MP1 pasižymėjo monolitinė struktūra, t.y. nepastebėta grūdėtumo.

Santrauka anglų kalba / Summary

A STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF THE PARTS PRINTED SLS

Simonas Mindaugas Jankus

The goal of this work was to investigate microstructure of the selective laser sintering (SLS) produced parts. The chemical composition of 316L, GP1, MP1 metal particles and their size distribution were examined using SEM-EDS technology. EOS EOSINT M280 selective laser sintering 3D printer was used for sample production. 316L, GP1, MP1 metal microparticles were sintered by continuous-wave Yb fiber laser (wavelength 1030 nm), scan speed 7 m/s and 40 μm layer thickness. The sample production required inert nitrogen gas to prevent metal particles from oxidation during 3D manufacturing. The microstructure of cross-section and surface of the produced parts was investigated by using scanning electron microscope (SEM). The surface of the 3D printed samples is measured by an optical profilometer. Metallographic analysis of produced parts were applied in pursuance to find out metal crystal structure.


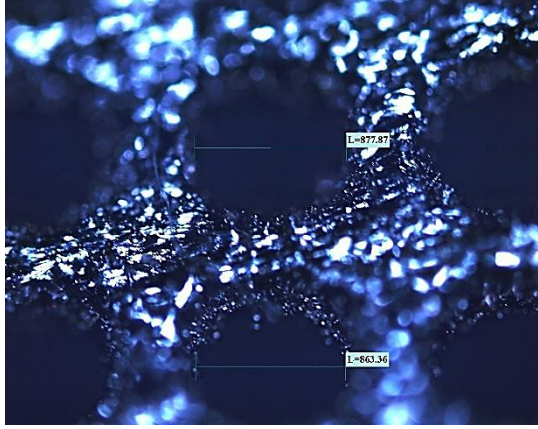

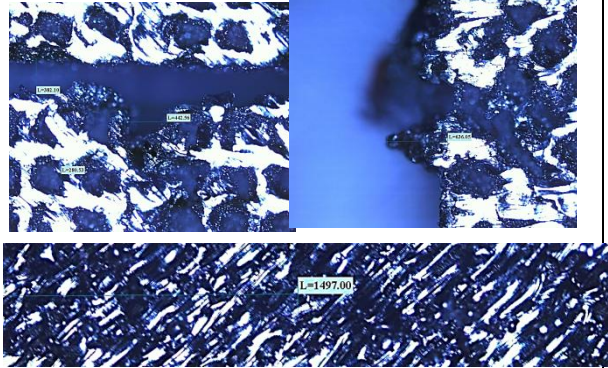
Studies have shown that printed samples of 316L and GP1 metal powders had a higher defect content compared printed components from MP1 powder material. From scanning electron microscopy (SEM), it was found that iron-based printed parts melted worse than MP1 components. Varying from 5 to 70 μm microcracks and pairs were observed in sample surface and in cross-section. The poor quality of steel parts was affected by inappropriate production mode. Iron-based 316L and GP1 metal powders did not get enough energy from laser to perform a better microwelding between particles. Steel melting point is higher than Co-Cr alloy. By the way, 316L and GP1 particles have lower thermal conductivity than MP1 material. It is quantitatively characterized by roughness measurements of the surface of the samples. Surface roughness R_a numerical values for samples 316L, GP1, MP1 respectively are $R_a = 13,715 \mu\text{m}$; $11,412 \mu\text{m}$; $3,006 \mu\text{m}$.

Cross-section of 316L, GP1 and MP1 parts were polished in order to determine crystal structure of the metals. Corrosive hydrochloric acid was used for sample surface etching. The fine-grain martensitic structure has been found in the stainless steel 316L and in the tool steel GP1. Samples from MP1 powder material featured a monolithic structure, i. e. no grain type structure on MP1 parts cross-section has been observed.

Priedai

Čia pateikiami SLS būdu pagamintų detalių defektoskopijos tyrimai. Įvertintos tiek techninės, tiek fundamentinės brokuotos SLS gamybos detalės. Rezultatai pateikti * lentelėje.

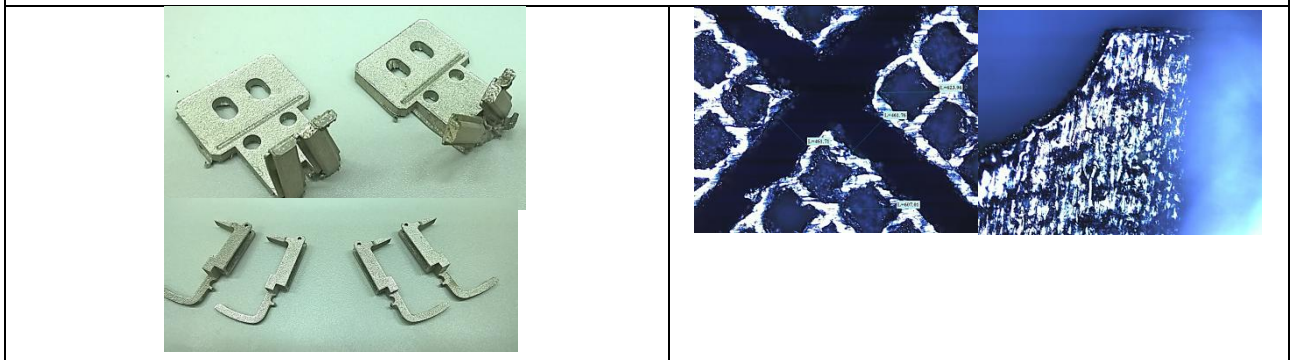
* **lentelė.** SLS būdu pagamintų struktūrų pavadinimas, objektų paviršius bei defektų įvertinimas.

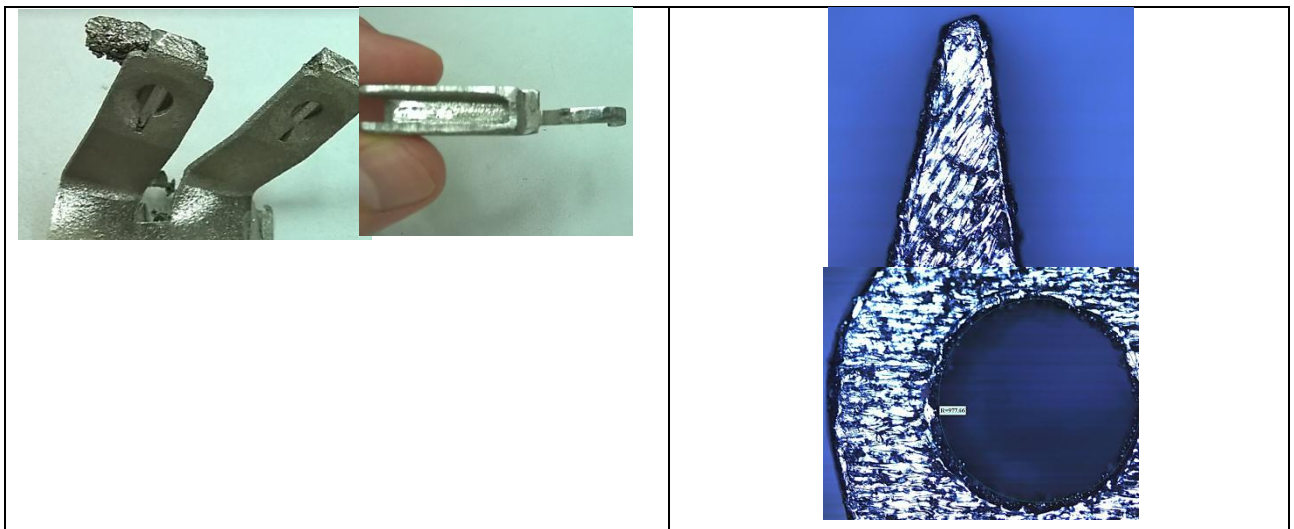
Driežas	
	
<p>Atspausdinto driežo tinklelio forma buvo sugadinta dėl netinkamos atraminės konstrukcijos parinkimo (kampo tarp detalės ir platformos), metalo miltelių dydžio dispersijos (dėl nepakankamai kokybiško metalo miltelių nusijojimo), dėl šilumos lauko dinamikos atsiradusiems įtempiams medžiagoje poliravimo metu deformavosi driežo pagrindukas. Taip pat, detalę galėjo sugadinti nepakankamai tikslus platformos pozicionavimas.</p>	
Fizinių ir technologijos mokslų centro logotipas	
	
<p>Pagrindinė problema atspausdinus nerūdijančio plieno 316L plokštelę su FTMC simboliu yra ta, kad dėl vidinių liekamųjų įtempių medžiagoje, po atspausdinimo mechaniškai atskiriant 3D gaminį nuo pagrindo platformos, jo pagrindo plokštės kraštai išlinko. Šį defektą gana sunku ištaisyti, nes toliau bandant išlyginti paviršių (pvz.: presuojant) medžiaga gali sutrūkinėti.</p>	
Slėginio indo prototipas	



Dėl netolygaus sluoksnio užnešimo, šiek tiek deformuoto peilio ir netinkamo objekto pozicionavimo ant platformos (prieš spausdinimą CAD modelio padėtis ant platformos) slėginio indo čiupas atsispausdino kampu. Taip pat, dėl blogo nusijojimo prastai atsispausdino užrašai ant baliono korpuso.

Karinei technikai skirtos detalės





Šios detalės deformavosi tiek dėl vidinių liekamųjų įtempių. Jas atpjaunant nuo pagrindo ir šlifuojant 3D struktūros deformavosi (t. y. prarado plokštiškumą, tam tikri elementai pakrypo tam tikrais kampais vienas kito atžvilgiu). Jau spausdinimo metu išryškėjo tam tikras elementų geometrinis nuokrypis.