



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Kęstutis Bučelis

**FE-NI-CO MILTELIŲ PAGRINDU SUKEPINTŲ BANDINIŲ LAZERINIO
LEGIRAVIMO TYRIMAS**

**THE RESEARCH OF LASER ALLOYING OF FE-NI-CO POWDER BASED, SLS
SAMPLES**

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

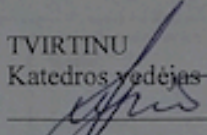
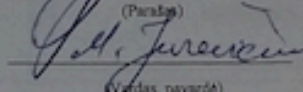
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(Parašas)

(Vardas, pavardė)
2019.05.29
(Data)

Kęstutis Bučelis

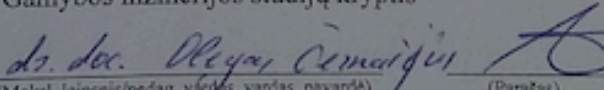
FE-NI-CO MILTELIŲ PAGRINDŲ SUKEPINTŲ BANDINIŲ LAZERINIO
LEGIRAVIMO TYRIMAS
THE RESEARCH OF LASER ALLOYING OF FE-NI-CO POWDER BASED, SLS
SAMPLES

Baigiamasis magistro darbas

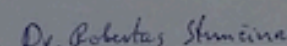
Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

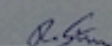
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas


(Moksl. laipsnis/pedag. vėjas, vardas, pavardė) (Parašas) 2019-05-28
(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas


(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)


(Parašas) 2019-05-28
(Data)

Vilnius, 2019

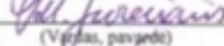
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 6211EX054

TVIRTINU

Katedros vedėjas


(Parašas)

(Vardas, pavardė)
2018.01.25
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2018.01.25 Nr. 01

Vilnius

Studentui (ei) Kęstučiui Bučeliui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintų bandinių lazerinio legiravimo tyrimas
patvirtinta 2017 m. Lapkričio 8 d. dekanų potvarkiu Nr. 322me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 18 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

LITERATŪROS ANALIZĖ: 1. Metalinių medžiagų lazerinio apdorojimo technologijų apžvalga. 2. Detalių paviršinio sluoksnio metalo modifikavimo ir legiravimo technologijų apžvalga. 3. Detalių paviršinio sluoksnio metalo tyrimo būdų apžvalga. EKSPERIMENTINĖ DALIS: 1. Eksperimento plano sudarymas. 2. Sukeptų bandinių savybių tyrimas. 3. Sukeptų bandinių lazerinio legiravimo technologijos parametrai parinkimas. 4. Sukeptų ir legiruočių bandinių fizikinių ir eksploatacinių savybių tyrimas. REZULTATŲ ANALIZĖ IR IŠVADŲ PARENGIMAS

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

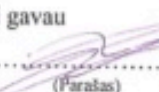
Dr. ROBERTAS STUNZINAS

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

Dr. doc. D. Černiauskas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau


(Parašas)
KĘSTUTIS BUČELIS
(Vardas, pavardė)
2018.01.25
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 3
Data 2019-03-23

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **FE-NI-CO MILTELIŲ PAGRINDU SUKEPINTU BANDINIŲ LAZERINIO
LEGIRAVIMO TYRIMAS**
Autorius **Kęstutis Bučelis** Vadovas dr. doc. **Olegas Černašėjus**

Kalba	
☒ X	Lietuvių
☐	užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos SLS būdu sukepintų gaminių paskesnio lazerinio mikroapdorojimo galimybės ir paviršinio sluoksnio lazerinio modifikavimo poveikis sluoksnio formavimosi procesui ir jo fizikinėms savybėms.

Darbe bandinių gamybai panaudotas selektyviojo lazerinio sukepinimo įrenginys „Concept Laser M3“. Bandinių papildomam paviršiaus modifikavimui buvo naudojamas CO₂ lazeris. Tiriama kaip skirtingi lazerinio apdorojimo režimai paveikia paviršių ir kokias savybes įgauna paviršius po papildomo modifikavimo. Tyrimo metu stebima paviršiaus fizikinių savybių priklausomybė perlydant sukepintą paviršių ir perlydant paviršių pridėjus amorfinio boro. Sudarytos diagramos vaizduojančios mikrokietumo priklausomybę nuo paviršiaus apdirbimo pobūdžio ir lazerinio apdorojimo režimų. Naudojant gautus tyrimo rezultatus parengiamos išvados, kokie režimai ir apdirbimo pobūdis yra būtini norint gauti geresnes SLS gaminių eksploatacines savybes.

Darbą sudaro 11 dalių: įvadas, literatūros analizė, eksperimento tyrimo metodika, SLS gaminių gamybos analizė, paviršiaus modifikavimo režimų analizė, mikrostruktūros tyrimas, mikrokietumo tyrimas, skenuojamoji elektroninė analizė, tyrimo rezultatai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis - 68 p. teksto be priedų, 44 pav., 11 lent., 33 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: SLS, lazerinis sukepinimas, lazerinis legiravimas, CO₂ lazeris, SEM, amorfinis boras, paviršiaus modifikavimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Fakulty of **Mechanics**
Department of **Mechanics and Material Engineering**

ISBN ISSN
Copies No. 3
Date 2019-03-23

Master Degree Studies **Materials and Welding Engineering** study programme Final (Master's Theses)

Title **THE RESEARCH OF LASER ALLOYING OF FE-NI-CO POWDER BASED, SLS SAMPLES**

Author **Kęstutis Bučelis**

Academic supervisor Assoc Prof. Dr. **Olegas Černašėjus**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The master's thesis analyses the possibilities for subsequent laser microprocessing of SLS alloyed products and the impact of the laser modification of the surface layer on the formation process and physical properties of the layer.

For the purpose of sample production, the research involved the use of the selective laser melting machine 'Concept Laser M3'. A CO₂ kilohertz laser was employed for additional surface modification of the samples. It was examined how different modes affect the surface and which properties the surface developed as a result of additional modification. During the testing, the dependence of physical properties of the surface was observed in the process of remelting of the alloyed surface and remelting of the surface with the addition of amorphous boron. Diagrams were drawn to show the dependence of microhardness on the type of surface processing. Based on the testing results, conclusions are provided as regards the modes and type of processing that are required in order to reach better performance characteristics of SLS products. The thesis consists of 11 parts: introduction, literature analysis, experimental testing methodology, analysis of SLS product production, analysis of surface modification modes, microstructural test, microhardness test, scanning electron analysis, results of the research and the list of literature.

Scope of the thesis: 68 pages excluding annexes, 44 figures, 11 tables, 33 bibliographical sources.

Keywords: SLS, Laser alloying, laser modification, CO₂ laser, SEM, amorphous boron.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Kęstutis Bučelis, 20075966

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Medžiagų ir suvirinimo inžinerija, Sifm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

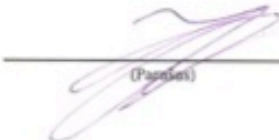
**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2019 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Fe-Ni-Co pagrindo miltelių sukepintų bandinių lazerinio legiravimo tyrimas“ patvirtintas 2019 m. balandžio 10 d. dekanų potvarkiu Nr. 107me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Olegas Černašėjus. Mano darbo vadovas docentas daktaras Olegas Černašėjus.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

Kęstutis Bučelis
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
IVADAS	11
1. Metalinių medžiagų lazerinio apdorojimo technologijų apžvalga	13
1.1. Adityvioji gamyba.....	13
1.1.1 Pagrindiniai 3D spausdinimo technologijos	13
1.1.2. Selektinio lazerio sukepinimo technologija	16
1.1.3 Lazerio spindulio pluošto poveikis apdirbamo metalo paviršiui	18
1.1.4 Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje	20
1.1.5 Lazerio pluošto skenavimo sistemos, skenavimo tipai, paviršiaus kietinimas	21
2. BANDINIŲ PAVIRŠINIO SLUOKSNIO METALO SAVYBIŲ TYRIMO METODOLOGIJA	26
2.1 Tyrimo objektas	26
2.2 Tyrimų eiga.....	27
2.2.1 SLS gaminių gamyba.....	27
2.2.2 SLS gaminių paskesnio modifikavimo režimai ir forma.....	29
2.3.1 Optinė mikroskopija.....	31
2.3.2 Mikrokietumo matavimai.....	32
2.3.3 Skenuojamoji elektroninė mikroskopija	33
2.3.4 Rentgeno spindulių difrakcijos analizė.....	34
2.4 Skaitinio modeliavimo metodika.....	34
2.4.1 Šilumos srautų skaičiavimo baigtinių elementų būdu metodika	35
3 TYRIMO REZULTATAI.....	40
3.1 Įvirinamumo tyrimas	40
3.2 Kietumo tyrimo rezultatai	44
3.3 Mikrokietumo tyrimo rezultatai.....	48
3.4 Skaitmeninio modeliavimo tyrimas	51
3.5 Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimas	56
3.6 Sukeptų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų bandinių mikrostruktūros analizė.....	57
IŠVADOS.....	65
LITERATŪRA	66

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Selektivityjo lazerinio sukepinimo procesas.....	14
1.2 pav. Stereolitografijos įrenginio veikimo schema	15
1.3 pav. Lydžios masės formavimo schema.....	15
1.4 pav. Selektivityjo lazerinio sukepinimo procesas.....	17
1.5 pav. Lazerinis paviršinio medžiagos sluoksnio garinimas.....	19
1.6 pav. SLS naudojamų skenavimų metodikų tipai: iš kairės į dešinę (žingsninis, rastrinis, vektorinis, šachmatų lentos tipo) skenavimai	22
2.1 pav. Sukepinto bandinio erdvinis vaizdas	27
2.2 pav. „Concept laser M3“ selektivityjo lazerinio sukepinimo įrenginys	28
2.3 pav. Sukeptintų bandinių šoninis paviršius	28
2.4 pav. Bandinio lazerinio legiravimo schema	31
2.5 pav. „Nikon MA200“ mikroskopas	31
2.6 pav. „Zwick Roell ZHμ“ universalus automatizuotas kietmatis	32
2.7 pav. „SEM JEOL JSM-7600F“ skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi	33
2.8 pav. Fe-Ni-Co miltelių rentgeno difrakcinė kreivė.....	34
2.9 pav. Bandinio vaizdas „Ansys Mechanical APDL 18.2“ platformoje	35
2.10 pav. Erdvinis sukepinto bandinio modelis, sudarytas iš baigtinių elementų	35
3.1 pav. A1 – A5 bandinių įvirinamumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant 0,5 mm lazerio dėmei.....	41
3.2 pav. B1 – B5 bandinių įvirinamumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant 0,5 mm lazerio dėmei.....	42
3.3 pav. Takelių įvirinimo pločio (μm) priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (lazerio dėmė 0,5 mm)	43
3.4 pav. Takelių įvirinimo gylio (μm) priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (lazerio dėmė 0,5 mm)	43
3.5 pav. A1-A5 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 0.5 mm.....	45
3.6 pav. B1-B5 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 0.5 mm	46
3.7 pav. B6-B9 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 2.0 mm.....	47
3.8 pav. Palyginamoji takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (bandiniai A1 – A5 ir B1 – B5, lazerio dėmės plotis 0.5 mm)	47
3.9 pav. Vickerso mikrokietumo vidurkių grafikas perlydytuose A serijos bandiniuose.....	49
3.10 pav. Vickerso mikrokietumo vidurkių grafikas perlydytuose B serijos bandiniuose su amorfiniu boru	49
3.11 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,005 s).....	51
3.12 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,01 s)	52
3.13 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,015 s).....	52

3.14 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,02 s)	53
3.15 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,005 s)	53
3.16 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,01 s)	54
3.17 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,015 s)	54
3.18 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,02 s)	55
3.19 pav. Bandinio su pridėtiniu boru sulydimo linijos SEM nuotrauka	56
3.20 pav. A1 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	57
3.21 pav. A2 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	58
3.22 pav. A3 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	58
3.23 pav. A4 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	59
3.24 pav. A5 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	59
3.25 pav. A10 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų	60
3.26 pav. B1 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 20 kartų, (c) - padidinta 50 kartų	61
3.27 pav. B5 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 20 kartų, (c) - padidinta 50 kartų	62
3.28 pav. B6 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 50 kartų	63

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Pagrindiniai mikrolazerinio apdorojimo procesai	19	
2.1 lentelė. Selektyviojo lazerinio sukepimo parametrai	28	
2.2 lentelė. Bandinių paskesnio legiravimo CO ₂ lazeriu režimai.....	30	
2.3 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis pagal gamintojo specifikaciją, masės %.....	34	
2.4 lentelė. Plieno DIN-1.2709 charakteristikos, sukepinto bandinio šilumos mainų matematiniam apskaičiavimui.....	39	
3.1 lentelė. Takelių įvirinamumas be priedų	40	
3.2 lentelė. Takelių įvirinamumas į bandinį padengus amorfiniu boru	41	
Tyrimo metu buvo atliktas bandinių perlydyto paviršiaus kietumo matavimas Vickerso metodu su 500 g. apkrova, išlaikant 15 s. Darbe pateikiami perlydytų paviršių kietumo aritmetiniai dydžiai apskaičiuoti prieš tai atmetus mažiausią ir didžiausią reikšmes iš 5 matavimų rezultatų.		44
Sukepinto SLS budu ir lazeriu neapdoroto bandinio kietumas siekia 362 HV. Sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių takelių paviršių kietumo tyrimo rezultatai pateikti 3.3-3.4 lentelėse. Analizuojant tyrimo rezultatus galima pastebėti, kad atliekant lazerinį apdorojimą sukepintų ir lazeriu apdorotų be priedų bandinių takelių paviršių kietumo reikšmės praktiškai nesikeičia ir svyruoja nuo 320 iki 339 HV priklausomai nuo apdorojimo greičio.....		44
3.3 lentelė. Vickerso kietumo matavimo rezultatai bandiniuose be pridėtinių medžiagų	44	
3.4 lentelė. Vickerso kietumo matavimo rezultatai bandiniuose su amorfiniu boru	45	
3.5 lentelė. Sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių mikrokietumo tyrimo rezultatai	48	
3.6 lentelė. Tirtų bandinių mikrokietumo vidurkiai	50	
3.7 lentelė bandinio su boru sulydymo ribos cheminės analizės rezultatai	57	

IVADAS

Problemos formulavimas

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 minimaliai žaliavų ir suteikiantys maksimalių rezultatų. Šis teiginys puikiai apibūdina pažangią, ekonomiškai naudingą lazerinę miltelių sukepinimo (SLS) technologiją. 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 minimaliai medžiagų, laiko ir žmogiškųjų išteklių. Pastaruoju metu daug dėmesio skiriama sudėtingų formų, technologiškai komplikuočių ir inovatyvių gaminių kūrimui. Mažėjant konstrukcijų matmenims ir siekiant pagerinti komponentų, mazgų, detalių ar įrenginių eksploatacines charakteristikas, detalių viduje būtina suformuoti, itin smulkias ir sudėtingas tepimo, oro ar aušinimo, kanalų sistemas, išlaikant nepakitusias išorines gaminio formas. Šiam tikslui pasiekti pasirenkama selektyviojo lazerinio sukepinimo (angl. *Selective Laser Sintering* arba SLS) technologiją. Naudojant SLS technologiją pasiekiamas aukštas komponentų matmenų tikslumas ($\pm 30 \mu\text{m}$) ir gamybos reprodukcija. Tačiau naudojant šią technologiją yra susiduriama su jos taikymo trūkumais: didelis paviršiaus šiurkštumas, mažas atsparumas korozijai ir netolygus sukepinto paviršiaus kietumas.

Problematika

Metalo miltelių sukepinimas lazeriu yra daugkartinis procesas, kurio metu susidaro savita struktūra, kurios pagrindinis ypatumas yra susisiekiančių skirtingo dydžio porų sistema. Formuojant kiekvieną sluoksnį vyksta medžiagos užgrūdinimas esant dideliam temperatūros poveikiui, dėl to sukepintame metale susidaro ženklūs liekamieji tempimo įtempiai. Tai lemia, kad SLS būdu sukepinto metalo mechaninės ir tribologinės savybės neprilygsta tradiciniu liejimu suformuotiems plieno gaminiams. Dėl nepalankių eksploatacijos sąlygų (dideli temperatūriniai svyravimai, dilimo poveikis, drėgmė ir kt.) sukepintų gaminių eksploatacijos laikas tesiekia 2–3 metus.

Tyrimų objektas

Selektyviuoju lazeriniu sukepinimo būdu pagaminti bei lazeriu papildomai apdoroti geležies-nikelio-kobalto pagrindo paviršiai.

Darbo tikslas

Ištirti sukepintų SLS būdu gaminių paskesnio lazerinio mikroapdorojimo galimybę ir nustatyti paviršinio sluoksnio lazerinio modifikavimo poveikį sluoksnio formavimosi procesui ir jo fizikinėms savybėms.

Tyrimo metodika

Magistro darbe taikomi eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimo metodai. Eksperimentų metu tiriamą bandinių paviršiai ir jų fizikines charakteristikas, parenkant skirtingus apdirbimo režimus ir apdirbimo pobūdžius. Skaitinio modeliavimo metu tiriamą sukepintų bandinių lazerinio apdorojimo šilumos mainai ir temperatūros pasiskirstymas apdorojimo metu.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti tyrimo rezultatai leidžia nustatyti, FeNiCo miltelių pagrindu gaminamų dalių, optimalius lazerinio apdorojimo režimus, kad būtų pasiektos geriausios eksploatacinės savybės. Nustačius tinkamą režimą galima ženkliai padidinti gaminių eksploatacinį laiką.

Magistro darbo struktūra

Magistro darbą sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados.

Pirmame skyriuje atlikta literatūros analizė, kuri apima inovatyvios 3D gamybos galimybes bei lazerinio spindulio pluošto poveikio apdirbamo metalo paviršiui analizę.

Antrame skyriuje apžvelgiami SLS gaminių gamybą, paskesnis gaminio legiravimas ir apdorojimas. Paviršiaus analizės būdai bei tyrimo atlikimo eiga.

Trečiame skyriuje pateikti tyrimu metu gauti rezultatai ir jų analizė.

1. Metalinių medžiagų lazerinio apdorojimo technologijų apžvalga

1.1. Adityvioji gamyba

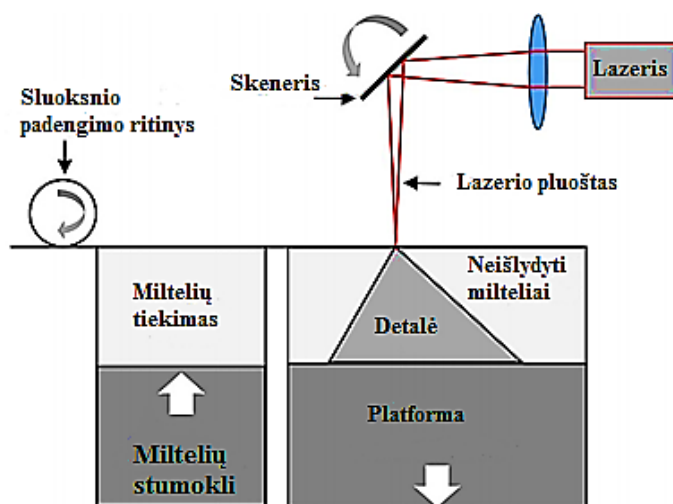
Adityvioji gamyba plačiausiai naudojama įvairiems mechaniniams gaminams gaminti, elektronikos bei elektrotechnikos pramonėje. Tiksliosios mechanikos, elektronikos ir elektrotechnikos komponentai labiausiai paplitę šiuolaikiniuose gaminiuose. Jie gali sudaryti tik gaminio korpusą, rėmą ar kitokius bazinius 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 parametrų gaminius (Balachinaitė et al., 2008). Gaminio geometrijai bei tikslumui išgauti 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 adityviosios gamybos metodas, padedantis greitai ir pigiai spręsti minėtas problemas (Balachinaitė et al., 2008).

Adityviosios gamybos technologijos pagrindinė dalis yra 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 (King et al., 2015).

1.1.1 Pagrindiniai 3D spausdinimo technologijos

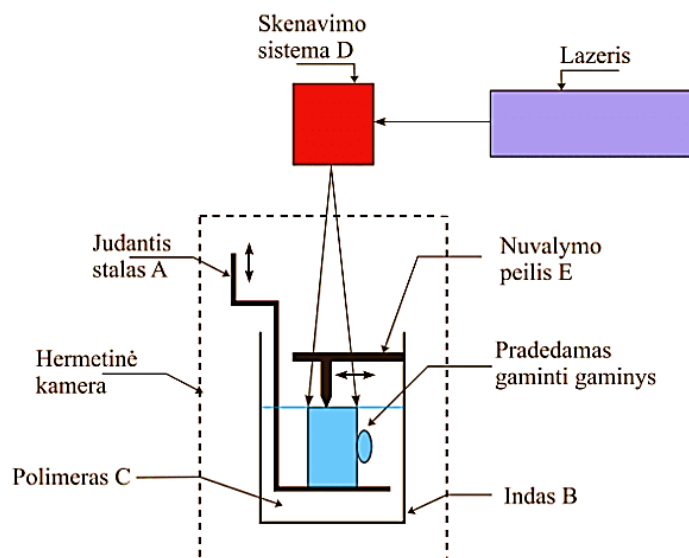
Lazerinis metalo miltelių sukepinimas (SLS) (1.1 pav.). Metalinių (titano, kobalto- chromo, volframo, molibdeno, nikelio, nerūdijančio plieno, įrankinio plieno, poliamidas, nailono kompozitai,

poliesteris kt.) miltelių lazerinio sukepinimo proceso metu gaminami 3D objektai sukepinant medžiagos miltelius dažniausiai nuolatinės veikos šviesolaidiniais (100 – 400 W) galios lazeriais. Lazeris sumoduliuotas taip, kad sulipdomos tik tos dalelės, kurios turi tiesioginę 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 $\pm 50 \mu\text{m}$ tikslumą. (Bikas et al., 2016).



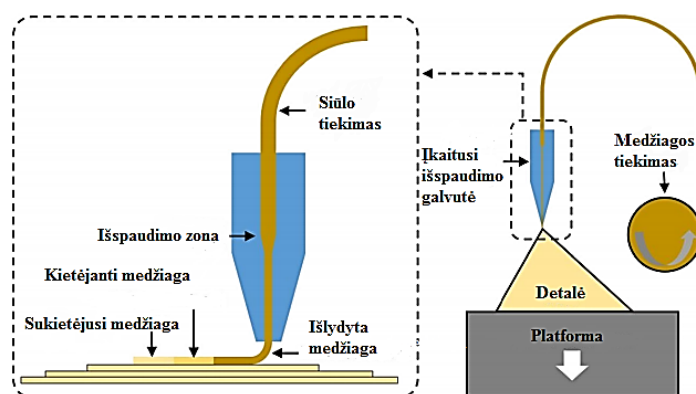
1.1 pav. Selektinio lazerinio sukepinimo procesas

Stereolitografija (1.2 pav.). 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.



1.2 pav. Stereolitografijos įrenginio veikimo schema

Lydzios masės formavimas (FDM) (1.3 pav.). Gamybos metu sluoksniais yra sudedama išlydyta polimerinė vija. Termoplastinė modeliujama medžiaga iš ritės, kurios storis apie 1,8 mm, paduodama į ekstruzinę įkaitusią galvutę, kurios temperatūra yra kontroliuojama. Joje vija įkaista iki pusiau skystos būsenos, kuri yra 0,5 °C didesnė nei lydymosi temperatūra. Tokiu būdu ji sukietėja per 0,1 sekundės po ekstruzijos. Išspaudžianti galvutė užlieja medžiagą labai plonais sluoksniais ant nejudamo pagrindo. Tolesni sluoksniai taip pat dedami ant ankstesnių, sukietėja ir susijungia. FDM metodu objektai gaminami iš ABS ir polikarbonatų.



1.3 pav. Lydzios masės formavimo schema

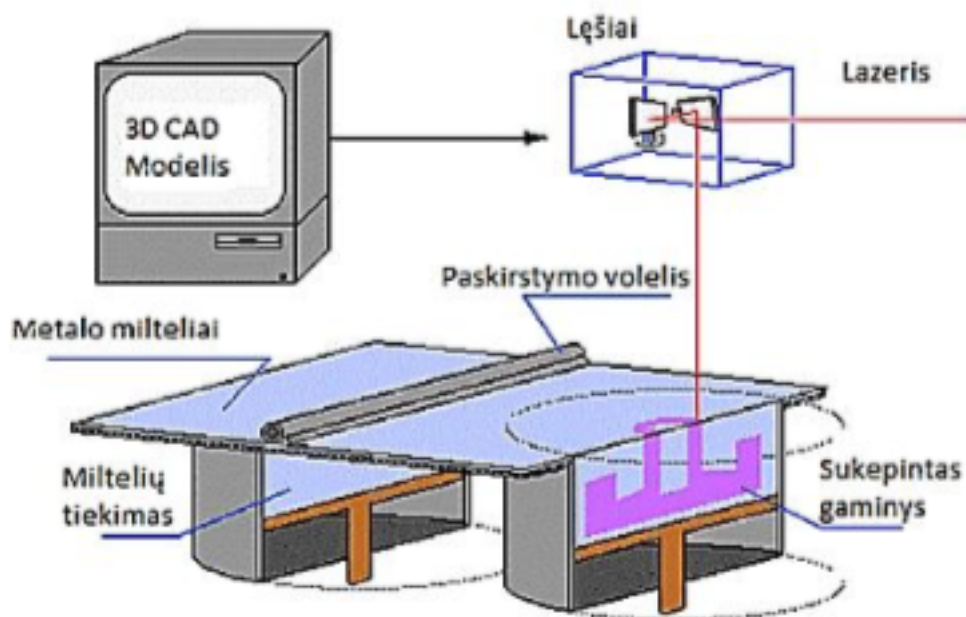
AG sudaro šie etapai:

- Trimačio modelio projektavimas. AG detalių gamyba prasideda nuo trimačio modelio projektavimo, kuris atspindi gaminio geometriją. Šis procesas gali būti atliktas su dauguma grafinių programų (Olakanmi et al., 2015).

- Erdvinio modelio konvertavimas į STL formatą. AG įrenginiai dirba tik STL duomenų formatu. Tokiu būdu paruošti duomenys leidžia sudaryti gaminio gamybos procesą.
- Erdvinio modelio perkėlimas į AG įrenginį. Skaitinis STL modelis privalo būti įkeltas į AG įrenginį. Jame atliekama modelio patikra: gabaritinių matmenų, geometrijos ir kt. (Paul et al., 2012).
- Technologinių procesų parametrų nustatymas. Prieš darbo pradžią atliekamas technologinių parametrų optimizavimas: lazerio spindulio pluošto galios, sukepinamo sluoksnio storio, lazerio poveikio laiko, apdorojimo greičio ir kt. (Farahmand et al., 2014).
- Gamyba. Automatizuotas procesas, tačiau minimalus monitoringas, siekiant įsitikinti, kad įrenginys veikia tinkamai, yra rekomenduojamas. Šiuo atveju stebimi šie technologiniai sutrikimai: elektros dingimas, žaliavos stygius, mechaninis gedimas.
- Papildomas apdorojimas. AG būdu pagamintos detalės dažnai turi būti papildomai apdorotos rankiniu arba mašininiu būdu, siekiant užtikrinti gaminio atitiktį aukštiesiems kokybės reikalavimams (Zhu et al., 2016). AG pagamintų tūrių metalas nepasižymi kietumu, tačiau savaime aišku, kad papildomas terminis apdorojimas yra būtinas, jei to reikalauja gaminio techninės charakteristikos.
- Gaminio pritaikymas. Atskirais atvejais reikalaujamas papildomas išorinių paviršių dekoravimas arba surinkimas į mazgus ar mechanizmus, norint įvertinti jų funkcionalumą ir estetinį vaizdą. (Manzirov et al., 2017). Būtina nepamiršti, kad žaliavai keliama aukšti kokybės reikalavimai. Dažniausiai tai įvairios formos ir sudėties milteliai. Jų sandėliavimo, saugojimo sąlygos yra griežtai apibrėžtos, siekiant pašalinti jų chemines reakcijas su išoriniais veiksniais. Taip pat AG naudojamos antrinės žaliavos. Šio tipo žaliavoms labai svarbu užtikrinti pradinę kontrolę, nes pakartotinis perdirbimas gali lemti žaliavos ir gaminio kokybės suprastėjimą.

1.1.2. Selektinio lazerio sukepinimo technologija

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.) (Vaitkūnaitė et al., 2014).



1.4 pav. Selektinio lazerinio sukepinimo procesas

Metalo mikromilteliai tolygiai paskirstomi vienodu storio gaminio formavimo zonos paviršiuje ir įkaitinami iki temperatūros, žemesnės nei lydymosi temperatūra. Lazerinis miltelių sukepinimo procesas grindžiamas aktyviai pastaruoju metu plėtojamu 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 (Markovič et al., 2013).

Pastaruoju metu medžiagų sintezė bei jų apdorojimo metodai tampa aktualiu klausimu medžiagotyros srityje, todėl sukepinimo technologija ir jos tobulinimas yra pagrindinis uždavinys sprendžiant šį klausimą. Nors, kad sukepinimo procesas žinomas nuo Kristaus laikų, tačiau išsamus šio reiškinio tyrimas pradėtas tik 1940 metais (Olanmi et al., 2015). Pagrindinis technologijos privalumas yra tai, kad sukepinimo būdu tarpusavyje galima sujungti praktiškai visų rūšių medžiagas. Tačiau prieš pradedant gamybą, būtina visapusiškai išnagrinėti būsimam gaminiui keliamus reikalavimus.

Pagrindinis sukepinimo tikslas – pagaminti tam tikros geometrijos tūrį su pageidaujamomis morfologinėmis ir topografinėmis charakteristikomis, keičiant proceso technologinius parametrus bei galėti atkartoti arba pagaminti naują, analogišką tūrį (Paul et al., 2012).

Įprastai sukepinimas skirstomas į kietos ir skystos fazės sukepinimą.

Kietos fazės sukepinimas vyksta tada, kai miltelinio pagrindo medžiaga sukepinama nepasiekiant skystos fazės (Manzirov 2017). Tai yra neviršijant medžiagos lydymosi temperatūros. Skystos fazės sukepinimo atveju proceso temperatūra viršija sukepinamos medžiagos lydymosi

temperatūrą (Balachninaite et al., 2008). Naudojant skystos fazės sukepinimo metodą, gaunamas kokybiškesnis gaminys negu esant kietos fazės sukepinimui (Merklein et al., 2016).

Sukepinimo proceso kokybę įtakoja kintamieji parametrai, kurie skirstomi į dvi pagrindines kategorijas:

- žaliavos;
- technologiniai proceso parametrai.

Žaliavų kategorijos kintamieji parametrai:

- miltelių cheminė sudėtis;
- miltelių frakcijos dydis;
- miltelių geometrinė forma;
- miltelių sulipimo ir išsimaišymo laipsnis.

Šie kintamieji parametrai veikia miltelių sukepinimą, spūdumą, grūdelių augimo greitį ir jų plastines savybes (Merklein et al., 2016).

Sukepinimas neįmanomas be aukštos kokybės žaliavos. Yra keli medžiagų mechaninio smulkinimo būdai, tačiau labiausiai paplitę šie malūnai: rutuliniai, planetariniai, išcentriniai, vibraciniai, atritoriniai ir kt. (Valiulis 2005).

Tokiu atveju, jei žaliava sudaryta iš dviejų ir daugiau rūšių miltelių, sukepinamos žaliavos homogeniškumas arba, kitaip sakant, išsimaišymo laipsnis turi didelę įtaką. Siekiant užtikrinti žaliavos homogeniškumą naudojamas ne tik mechaninis miltelių malimas, bet ir cheminiai procesai (Farahmand et al., 2016).

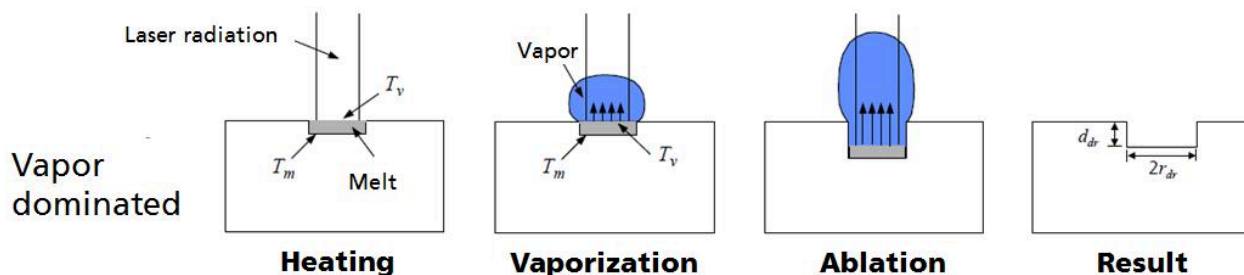
Technologinių procesų kategorijos kintamieji parametrai apima šias sritis:

- proceso temperatūrą;
- atmosferos slėgį;
- kaitinimo ir aušinimo greitį.

1.1.3 Lazerio spindulio pluošto poveikis apdirbamo metalo paviršiui

Kai lazerio spindulio pluošto energija pasiekia 105 W/cm² vertę (bendroji reikšmė plienams), apdirbamo ploto temperatūra pakyla virš lydymosi taško ir prasideda lazerinio lydymo procesas. Dažniausiai, siekiant sumažinti paviršinio sluoksnio mikronelygumų aukštį bei defektų skaičių, lazerinis lydymas atliekamas tiesiogiai apdirbant darbinį paviršių (Balachninaite et al., 2008).

Kai apdirbamo ploto paviršiaus temperatūra priartėja prie virimo temperatūros, tolesnis įvedamos į ploto vienetą energijos didinimas pradeda medžiagos garinimą (1.5 pav.). Lazerinis medžiagos garinimas vyksta ne tik iš paviršinio apdirbamo ploto, bet iš sluoksnio, esančio žemiau išorinio detalės ar gaminio sluoksnio (Gibson et al., 2015).



1.5 pav. Lazerinis paviršinio medžiagos sluoksnio garinimas

Dauguma medžiagų, veikiamų didelės energijos, skyla į sudedamąsias dalis arba išskiria tam tikras medžiagas, degimo produktus ir kt. Vyksta medžiagos disociacijos procesas. Disociacijos sparta arba efektyvumas priklauso nuo apdirbamos medžiagos charakteristikų. Disociacijos metu apdirbamo ploto paviršiuje atsiranda atitransos slėgis (Long et al., 2015).

Paviršiaus absorbuotas energijos kiekis bei temperatūra tiesiogiai veikia atitransos slėgį, kuris yra kritinis faktorius šalinant apdirbamo sluoksnio medžiagą lazerinio mikroapdorojimo metu (Gu et al. 2009).

Kai lazerio spindulio pluošto energijos tankis viršija kritinę ribą (10^5 W/cm^2), medžiaga yra nepertraukiamai garinama. Šio proceso metu vyksta labai sparti paviršinio sluoksnio jonizacija ir formuojasi plazma, kurios slėgis gali siekti iki 500 MPa, o temperatūra daugiau nei 5000 K (Balachninaite et al., 2008).

Plazmos srautas atlieka apsauginio ekrano vaidmenį. Tačiau dažniausiai plazmos formavimas apdirbamo ploto paviršiuje nėra pageidautinas dėl lazerinio proceso metu vykstančio apdorojimo efektyvumo sumažėjimo. Dėl šios priežasties apdirbamo ploto jonizacijos laipsnis yra griežtai kontroliuojamas parametras (Bhaduri et al., 2016).

Keičiant įvedamos energijos kiekį, galima gauti skirtingus lazerinio apdorojimo metodus, besiskiriančius tarpusavyje savo fizikine prigimtimi (1.1 lentelė) (Demir et al., 2014). Prieš tai išvardyti mikrolazerinio apdorojimo metodai yra pateikiami kaip atskiri būdai, būtina suprasti, kad riba, kai vienas procesas keičia kitą, yra labai siaura.

1.1 lentelė. Pagrindiniai mikrolazerinio apdorojimo procesai (Balachninaite et al. 2008)

Energijos tankis, W/cm^2	Iki 10^4	10^4 – 10^5	10^5 – 10^6	10^6 – 10^7
Mikrolazerinio apdorojimo procesas	Kaitinimas	Lydymas	Garinimas	Ekranuojanti plazma

Lazerio spindulio pluošto ir apdorojamo paviršiaus sąveikos trukmė yra labai svarbus parametras, lemiantis lazerinės spinduliuotės poveikį medžiagai. Lazerinės spinduliuotės sugėrimą lemia sąveika su apdirbamoje medžiagoje esančiais elektronais. Sugėrę spinduliuotės kvantą elektronai peršoka į aukštesnį sužadintą lygmenį. Sugerta energija virsta šiluma, todėl lazerinę spinduliuotę galima nagrinėti kaip šilumos šaltinį, esantį detalės paviršiuje arba arti jo (Sovizi et al., 2005).

Parenkant paviršiaus apdorojimo būdą, reikia atsižvelgti į šias svarbiausias lazerinės technologijos taikymo ypatybes (Gibson et al., 2015):

- Sufokusuoto lazerio spindulio pluošto galios tankis yra didesnis nei daugelio kitų kaitinimo šaltinių.
- Lazerio spindulio pluoštu galima paveikti nedidelę apdirbamos detalės sritį ($0,1\ \mu\text{m}$ ir mažesnę), todėl galima apdirbti labai preciziškai.
- Lazerio spindulio pluošto energija yra didelė, todėl apdorojimas trunka daug trumpiau nei kitais būdais.
- Dėl lazerinio proceso lokalumo ir spartos išvengiama liekamųjų deformacijų, neiškraipoma geometrija.
- Dėl didelio lazerio spindulio pluošto galios tankio galima apdirbti beveik visas žinomas medžiagas: tiek metalus, tiek nemetelines medžiagas.
- Lazerio spindulio pluoštą galima nukreipti iš vienos darbo vietos į kitą bei naudojant optines ir veidrodines sistemas, galima apdirbti sunkiai pasiekiamas vietas.
- Lazerio spindulio pluoštas, palyginti su elektronų spindulio pluoštu, kurio technologinės galimybės analogiškos, yra pranašesnis tuo, kad nereikia vakuumo kamerų.
- Kadangi lazerio spindulio pluošto poveikis yra bekontaktis, technologinis procesas yra švarus.
- Procesas gali būti pritaikytas visiškam automatizavimui.

1.1.4 Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje

Remiantis darbe atlikta analize, lazerinio proceso našumas labai priklauso nuo apdorojimo proceso parametrų bei apdorojamos medžiagos paviršinio sluoksnio geometrinių ir fizikinių charakteristikų. Perėjimą nuo vieno mikrolazerinio apdorojimo proceso prie kito lemia skirtingas energijos kiekis, suteiktas ploto vienetui. Tai lemia paviršinio sluoksnio morfologiją bei mechaninių charakteristikų pokytį. Todėl visiškai aišku, kad būtina nustatyti lazeriu apdirbamo paviršiaus struktūrinių pokyčių principus (Zhu et al., 2016).

Metalui pereinant iš vienos polimorfinės modifikacijos į kitą, šiluma sugerama (kaitinant) arba išskiriama (aušinant). Tam reikalingas atitinkamo dydžio perkaitinimas arba atitinkamai peraušinimas lyginant su pradine būseną. Fizikiniams ir struktūriniais pokyčiams tirti naudojamos lydinų būsenos diagramos. Plieno terminio apdorojimo procesas prasideda kaitinant termiškai stabilaus austenito srityje. Užgrūdinto plieno savybės priklauso nuo kaitinimo temperatūros, trukmės ir aušinimo greičio (Valiulis 2008).

Terminio poveikio rezultatas priklauso nuo austenito virsmo produktų savybių auštant (grūdelių dydis, vienalytiškumo laipsnis). Pliene gali susiformuoti dviejų tipų ribinė struktūra: stambiagrūdė ir smulkiagrūdė. Lazeriniam grūdinimui būdingas didelis perkaitinimas, staigus aušinimas, todėl esant stambiagrūdei plieno mikrostruktūrai, gali susiformuoti terminiai įtrūkiai. Visa tai lemia, kad lazerinį apdorojimą geriau taikyti smulkiagrūdės mikrostruktūros plienui.

Atliekant eksperimentus, pastebėta, kad (Mishra et al., 2015):

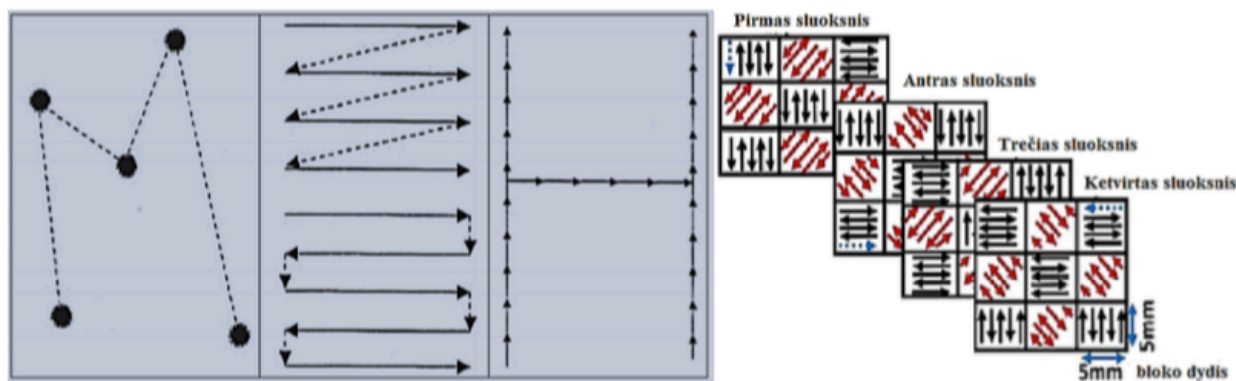
- Lazerinio poveikio metu austenizacija vyksta greičiau nei toje pačioje temperatūroje kaitinant ruošinius tradiciniais būdais;
- Vienkartinio poveikio impulsai trumpi, todėl metalo fazės nespėja difuziškai sąveikauti.

Lazerinio apdorojimo metu, greitai auštant bandiniui, vyksta nedifuziniai virsmai. Kubinė centruoto paviršiaus austenito gardelė virsta iškreipta centruoto tūrio martensito gardele (Ulkar et al., 2010). Tačiau ne visas austenitas virsta martensitu, todėl grūdintuose plienuose visada yra liekamojo austenito.

1.1.5 Lazerio pluošto skenavimo sistemos, skenavimo tipai, paviršiaus kietinimas

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 (Balachinaitė et al. 2008). Priklausomai nuo objekto dydžio bei formos ypatybių SLS 3D spausdiname naudojami penki skirtingi skenavimo metodai (1.6 pav.):

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



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

Apdirbamo kūno paviršiaus kietinimas atsiranda dėl lazerinės spinduliuotės sugerties. Keičiant lazerinės spinduliuotės energetinius parametrus, gaunami įvairūs lazerinio apdorojimo procesai (Balachninaite et al., 2008). Apdorojimas lazeriu dėl mažo terminio poveikio lauko bei aukšto tikslumo vadinamas mikrolazerinis apdorojimas.

Vienas labiausiai paplitusių lazerinio apdorojimo būdų yra sukietinimas. Šiuo būdu galima sukietinti detalių paviršius, ypač tada, kai reikalingas lokalus poveikis. Šiuo būdu taip pat galima keisti sukietintamo sluoksnio gylį, nekeičiant detalės geometrinių matmenų. Tai ypač svarbu tikslųjų prietaisų gamyboje (Kumar et al., 2009).

Sukietinto medžiagos sluoksnio storis, plotis, kietumas ir kt. daugiausia priklauso nuo (Gu et al., 2009):

- spinduliuotės energetinių parametrų;
- fizikinių medžiagos charakteristikų;
- apdirbamo kūno gabaritinių matmenų;
- apdorojimo greičio.

Lazerio spinduliuote sukietintas metalo sluoksnis susideda iš trijų būdingų mechaninio kietumo sričių (Kumar et al., 2007):

- Pirmoji sritis – tai sukietintas paviršiaus sluoksnis, kuris maždaug 0,03– 0,08 mm gylyje yra šiek tiek minkštesnis negu giliau esantis.
- Antroji sritis yra didžiausio metalo kietumo sritis. Didėjant atstumui nuo gaminio paviršiaus, metalo kietumas laipsniškai mažėja ir pasiekia dydį, mažesnį už kritinį, t. y. mažesnį už pagrindinio metalo kietumą, kai grūdinama tūriniu būdu.
- Trečioji sritis – jos kietumas mažesnis nes lėtai sklindant šilumai į gilesnius sluoksnius, užgrūdintas metalas atsileidžia.

Sukietinimas impulsinio lazerio spinduliuote yra lėtas procesas ir daugiausia naudojamas smulkių detalių ir mažų matmenų įrankių paviršiams apdirbti. Šio proceso našumas nedidelis, nes tokių technologinių lazerių impulsų dažnis paprastai neviršija 30 Hz (Jiang et al., 2005).

Gerokai efektyviau sukietinama nuolatinės veikos lazeriais. Jais gaunamas storesnis ir tolygesnis sukietintas sluoksnis, o procesas vyksta 2–4 kartus greičiau negu impulsiniais lazeriais (Jiang et al., 2005).

Lazeriu sukietinto metalo paviršius dėl terminio poveikio iš dalies oksiduojasi ir patamsėja nei paviršius, nepaveiktas lazerio spinduliuotės. Lazerio spinduliuote sukietintas sluoksnis yra ryškiai matomas detalės paviršiuje. Išorėje metalo struktūra yra smulkiagrūdė ir giliau pamažu pereina į pradinę struktūrą. Toks sukietintas sluoksnis, laipsniškai pereinantis į pradinę struktūrą, yra gerai sukibęs ir pasižymi geromis eksplotacinėmis savybėmis (Murthy et al., 2011).

Smūginis kietinimas. Šiuolaikiniai lazeriai leidžia gauti didelio intensyvumo 1010–1012 W/cm² ir mažos trukmės 10–8–10–14 s impulsus. Impulso trukmė artima relaksacijos laikui 10–9–10–11 s. Dėl to lazerio spinduliuotės šiluminė energija nespėja giliai įsiskverbti į pagrindinį metalą. Labai didelė energijos koncentracija paviršinio sluoksnyje sukelia medžiagos plazminę būseną. Susidarant plazmai, kyla didelis slėgis ir gali susiformuoti, kaip ir sprogo atveju, smūginė banga. Smūginė banga susiformuoja, jei lazerio spinduliuotės poveikio trukmė trumpesnė už smūginės bangos sklidimo laiką (Zhang et al., 2007).

Apdirbamą paviršių veikiantis mechaninio poveikio impulsas kyla medžiagai staigiai pereinant į plazminę būseną ir išgaruojant į aplinką. Vienu metu veikiant ir smūgio bangai, ir mechaniniam impulsui, paviršiuje susidaro kūgio formos įduba (Zhang et al., 2007).

Pagrindinis paviršių smūginio kietinimo trūkumas – paviršiuje susidaro įdubų, kurios pablogina apdirbamo paviršiaus kokybę.

Grūdinimas. Vienas iš paviršių apdorojimo lazerio spindulio pluoštu pranašumų – labai staigus, lokalus paviršiaus įkaitinimas su paskesniu greitu aušinimu. Kadangi grūdinamos detalės paviršius greitai įkaista ir greitai ataušta, jame susidaro smulkiagrūdžio martensito sluoksnis. Dėl susidariusių didelių terminių įtempių, plastiškai deformuojasi metalo kristalinė gardelė ir padidėja dislokacijų tankis. Dėl to paviršinis sluoksnis užsigrūdina ir tampa gerokai atsparesnis (Kumar et al. 2007). Metalų grūdinto sluoksnio kietumas ir storis yra susiję. Kuo daugiau metalas sugeria lazerio spinduliuotės, tuo gilesnis poveikis ir kietesnis paviršinis sluoksnis (Romano et al., 2015). Tačiau didinant spinduliuotės intensyvumą, detalės paviršius gali pradėti lydytis.

Lazerio spinduliuote užgrūdintas paviršinis sluoksnis susideda iš keturių sričių (Gillner et al., 2005):

- Pagrindinio metalo srities.
- Atleidimo srities, kurios kietumas gerokai sumažėjęs, nes nebėra martensito.
- Terminio poveikio srities. Tai didžiausio kiekio martensitinės struktūros sritis. Apatinėje šios srities dalyje yra martensitinės ir feritinės struktūros grūdinimo zona.
- Išlydytos srities, kurios struktūra paprastai būna dendritiniai martensito kristalai. Tai užgrūdintas paviršinis sluoksnis, kuris maždaug 0,02– 0,08 mm gylyje gali būti šiek tiek minkštesnis negu gilesnėje srityje.

Paviršių aplydymas. Lazerinis paviršiaus aplydymas atliekamas panašiai kaip ir grūdinant, tik papildomai išlydomas paviršinis detalės sluoksnis. Lazerinio aplydymo metu apdirbamos detalės paviršiniame sluoksnyje vyksta sudėtingi procesai: skysto metalo zonoje stebimi aukšti temperatūros gradientai, o tai sukelia didelius paviršiaus įtempius bei skysto metalo konvekciją. Paviršinio sluoksnio mikroreljefui didžiausią įtaką turi lazerinės spinduliuotės intensyvumas (Kumar et al., 2007).

Paviršių legiravimas. Legiravimas lazeriu nuo lazerinio grūdinimo skiriasi tuo, kad keičiasi sukietinto paviršinio sluoksnio cheminė sudėtis. Detalės paviršius padengiamas legiruojamu elementu, miltelių sluoksniu arba įvairių rūšių pastomis. Veikiamas lazerio spinduliuotės, paviršius lydosi ir legiravimo elementai patenka į skysto metalo vonią, kur vėliau kristalizuojasi. Susidaro naujo lydinio sluoksnis, kuris tvirtai sujungtas su pagrindinio metalo tūriu. Šio sluoksnio mikrostruktūra ir gylis priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo, bei poveikio trukmės ir svyruoja nuo 0,05 iki 2 mm (Murthy et al., 2011).

Tam, kad lazeriu legiruotas paviršius būtų lygus ir glotnus, reikia atlikti baigiamąją apdorojimo operaciją - paviršių nušlifuoti. Lazerinio legiravimo metu reikia parinkti tikslius energetinius parametrus ir režimus, jie turi būti optimizuoti kiekvienam legiravimo elementui arba kelių legiravimo elementų mišiniui ir pagrindiniam metalui (Balachninaite et al., 2008). Nuo legiruojančiųjų elementų kiekio priklauso gaminio ar mazgo eksploatacinės ir kokybinės charakteristikos.

Paviršių amorfinimas. Kai išlydytas paviršinis sluoksnis staigiai ataušinamas (105–108 K/s), kai kurių metalų klampumas tiek daug padidėja, kad nespėja susiformuoti metalo kristalizacijos centrai ir metalo paviršinis sluoksnis kietėdamas įgauna amorfinę struktūrą (Zhang et al., 2007). Amorfiniam metalo paviršiniame sluoksnyje būdingas netvarkingas atomų išdėstymas. Medžiagos tinkamumas amorfizacijai priklauso nuo cheminės sudėties, kristalizacijos centrų susiformavimo greičio ir kitų veiksnių (Gillner et al., 2005). Naudojant paviršių amorfinimo technologiją, gaunami feromagnetiniai lydiniai. Jų koercityvinė jėga 104 kartų mažesnė nei esant įprastai kristalinei medžiagos struktūrai. Detalės, turinčios amorfiną paviršių, yra atsparios korozijai ir radioaktyviam poveikiui (Ulkar et al.,

2010). Kadangi lazerio spindulio pluošto dėmė ant apdirbamo paviršiaus yra nedidelių matmenų, paviršiams amorfinti geriau tinka nuolatinės veikos lazeriai (Zaeh et al., 2011).

Paviršiaus plakiravimas – tai paviršiaus, padengto specialia pasta, milteliais ar kietais komponentais, perlydymas, suteikiant jam specifinių savybių. Plakiravimo būdai skirstomi pagal tai, kaip į darbo zoną yra tiekama paviršių dengianti medžiaga (Bhaduri et al., 2016). Iš dengiamos medžiagos miltelių arba pastos gali būti suformuojamas sluoksnis ant apdirbamo paviršiaus, kuris yra sulydomas lazeriu apsauginių dujų aplinkoje ir sudaro paviršių dengiantį sluoksnį. Kitu atveju dengiama medžiaga gali būti automatiškai tepama ant paviršiaus kaip pasta tiekama į lazerio poveikio zoną milteliais kartu su apsauginių dujų srautu (Chavoshi et al., 2017). Taip pat gali būti naudojama dengiamos medžiagos viela, kuri lazeriu veikiamoje zonoje išslydoma ant dengiamo paviršiaus.

Dengimas. Lazerinis paviršiaus dengimas arba garų nusodinimas dažniausiai atliekamas lazerine spinduliuote išgarintos dengimo medžiagos dalelės nusodinamos ant dengiamo paviršiaus. Lazerinis paviršių dengimas naudojamas, kai reikia ant dengiamo paviršiaus sudaryti plonas metalines plėveles, izoliacinės medžiagos sluoksnį arba kitokią specifinėmis savybėmis pasižymintį darinį (Manzirov et al., 2017).

Lazerinis paviršiaus valymas tai efektyvus būdas nešvarumams ar nereikalingam medžiagos sluoksniui nuo gaminio paviršiaus šalinti, naudojant lazerio spinduliuotę. Taip valoma nepažeidžiant paviršiaus ir neteršiant aplinkos, bei sutaupoma vandens, kuris paprastai gausiai naudojamas, taikant tradicinius paviršiaus valymo metodus (Chavoshi et al., 2016).

2. BANDINIŲ PAVIRŠINIO SLUOKSNIO METALO SAVYBIŲ TYRIMO METODOLOGIJA

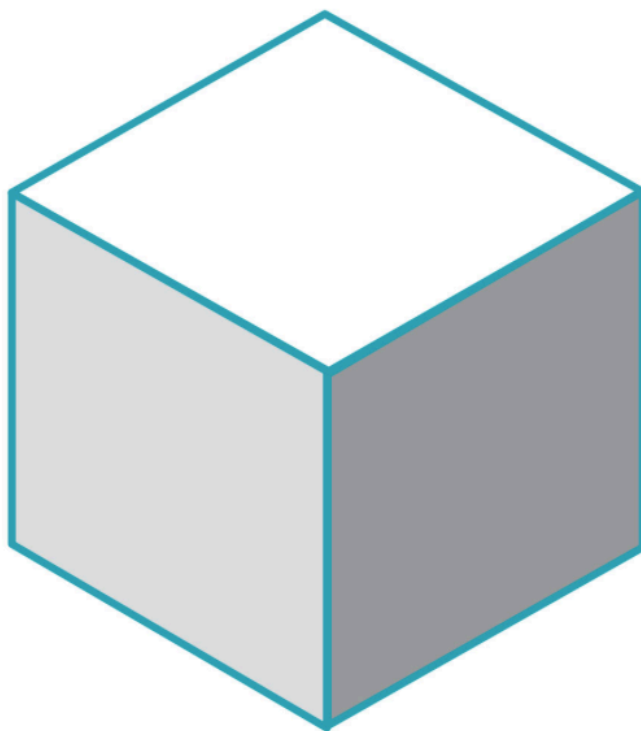
Darbe atlikti kompleksiniai sukepinimo ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdoroto paviršiaus tyrimai. Jų metu analizuota sukepinimo ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdoroto paviršiaus makro ir mikrostruktūra, cheminė sudėtis ir fizikinės savybės. Atlikti eksperimentinių bandinių mikrokietumo tyrimai, bei lazerinio apdorojimo šilumos mainų skaitinis modeliavimas.

2.1 Tyrimo objektas

Šio darbo tyrimo objektas – selektyviuoju lazeriniu sukepinimo būdu pagaminti bei lazeriu papildomai apdoroti geležies-nikelio-kobalto pagrindo paviršiai 2.1 pav. Miltelinio pagrindo bandinių gamybai panaudotas Concept Laser M3 selektyviojo lazerio sukepinimo įrenginys. Tyrimo metu SLS metodu buvo pagaminti plieno DIN 1.2709 miltelių pagrindu sukepinti kūbai, kurių matmenys: ilgis – 15 mm. plotis – 15 mm. aukštis – 10 mm. DIN 1.2709 plienas yra martensitinis plienas, kurio cheminė sudėtis atitinka Jungtinių valstijų klasifikacijos (18% Ni) žymėjimą 300, Europinį žymėjimą DIN 1.2709 ir Vokietijos žymėjimą X3NiCoMoTi 18-9-5. Šis plienas puikiai išlaiko stiprumines ir kietumo savybes taip pat turi labai geras mechanines charakteristikas. Šio plieno savybės labai lengva pagerinti terminio apdirbimo būdu, norint padidinti stiprumines ir kietumo savybes. Plieną 1.2709 yra lengvai apdirbamas po gamybos proceso ir gali būti nesunkiai padidintas kietumas iki 50 HRC panaudojant terminio sendinimo būdą įkaitinus plieną iki 490°C (914°F) ir išlaikant šešias valandas.

Termiškai neapdoroto DIN 1.2709 plieno mechaninės savybės:

- Tankis $\rho = 8100 \text{ kg/m}^3$;
- Šiluminis laidumas $K = 15 \text{ Wm}^{-1}$;
- Savitoji šiluminė talpa $C = 450 \text{ J/kg}$;
- Temperatūrinis plėtimosi koeficientas $A = 10.3 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^\circ\text{C}$;
- Tamprumo modulis $E = 160 \text{ Gpa}$;
- Takumo riba $R_{0.2} = 1000 \text{ Mpa}$;
- Stiprumo riba $R_m = 1100 \text{ MPa}$;
- Kietumas $\text{HRC}(5) = 33$; $\text{HV}(0,5) = 360$;
- Puansono koeficientas $\nu = 0,3$;
- Santykinis pailgėjimas $A = 8 \%$.



2.1 pav. Sukepinto bandinio erdvinis vaizdas

2.2 Tyrimų eiga

2.2.1 SLS gaminių gamyba

Miltelinio pagrindo bandinių gamybai panaudotas Concept Laser M3 selektyviojo lazerinio sukepinimo įrenginys (2.2 pav.). Bandinių sukepinimo metu pagrindinių įrenginio technologinių parametrų keitimas yra neįmanomas dėl gamintojo nustatytų apribojimų, siekiant užtikrinti įrenginio našumą bei gaminamos produkcijos kokybę. Technologiniai selektyviojo lazerinio sukepinimo parametrai pateikiami 2.2 lentelėje. Sukepintam tūriui atskirti nuo substrato buvo panaudotos vielinės elektroerozijos staklės „Charmille cut 200“. Atskirti nuo substrato bandiniai nuvalyti ultragarso vonelėje. Vonelės tūriui užpildyti panaudotas C_3H_8O tirpalas. Valymo trukmė 15 min. Valymo terpės temperatūra 40 °C.

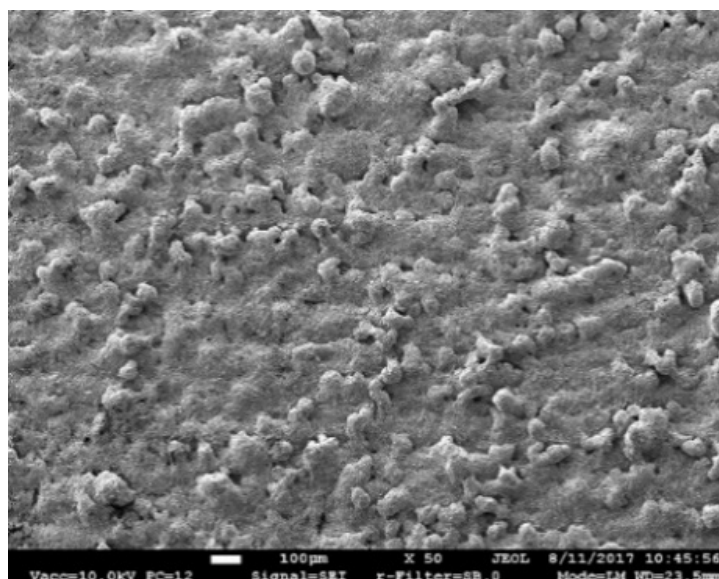
2.1 lentelė. Selektinio lazerinio sukepinimo parametrai

Lazerio bangos ilgis, nm	1064
Lazerio galia, W	100
Lazerio dėmės dydis, mm	Ø 0,2
Metalo miltelių sluoksnio storis, µm	30
Sukepinimo greitis, mm/s	0,2
Apsauginės dujos	Argonas
Apsauginių dujų debitas l/h	0,75



2.2 pav. „Concept laser M3“ selektinio lazerinio sukepinimo įrenginys

Atlikus mikroskopinius sukeptųjų bandinių tyrimus, nustatyta, kad šoniniuose sukeptųjų bandinių paviršiuose matomi netvarkingai ir chaotiškai išsidėstę iškilimai (2.3 pav.).



2.3 pav. Sukeptųjų bandinių šoninis paviršius

2.2.2 SLS gaminių paskesnio modifikavimo režimai ir forma

Tyrimo metu, siekiant pagerinti sukepinto gaminio paviršiaus savybes buvo papildomai perlydomas paviršius CO₂ lazeriu. 2.2 lentelėje pateikiami bandinių paskesnio legiravimo CO₂ lazeriu režimai. Lazerinio apdorojimo galia ir dažnis buvo parinkti remiantys patirtimi. Reikalingas lazerio impulso poveikio laikas buvo parinktas taikant sukepintų bandinių lazerinio legiravimo šilumos mainų skaitinį modeliavimą. Lazerinio apdorojimo greičiai buvo parinkti taip, kad atskirų impulsų perdengimo koeficientas būtų ne mažesnis kaip 70%. Toks koeficiento dydis yra pakankamas lazeriniam paviršiaus legiravimui.

Lazerio impulso energija apskaičiuojama pagal formulę 2.1:

$$Ei = \frac{P}{\nu} = \frac{1000 \text{ W}}{20 \text{ Hz}} = 50 \text{ J}; \quad (2.1)$$

čia:

P – lazerio galia W;

ν - lazerio dažnis.

Lazerio dėmės plotas apskaičiuojamas pagal formulę 2.2.

$$S = \pi r^2 \quad (2.2)$$

čia:

S - lazerio dėmės plotas;

r - lazerio dėmės spindulys;

$$S(0.5) = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$S(2) = 31,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$S(3) = 70,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

Vienos lazerio dėmės energijos tankis apskaičiuojamas pagal formulę 2.3:

$$Fd = \frac{2Ei}{S}; \text{ J/m}^2 \quad (2.3)$$

Lazerinio apdorojimo perdengimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę 2.4:

$$Per = \left(1 - \frac{VTf}{W + VTp}\right) 100; \% \quad (2.4)$$

Lazerio impulso laikas $Tf = 20 \text{ ms} = 0,02 \text{ s}$;

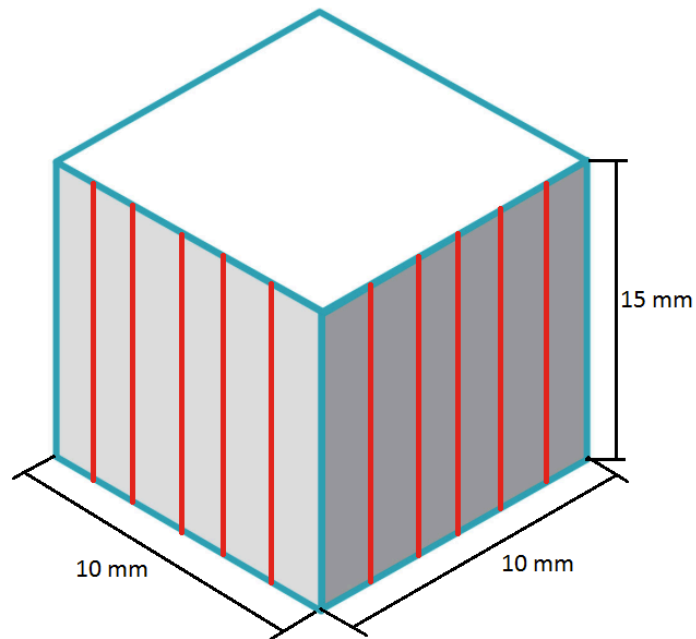
Lazerio dažnis $V = 20 \text{ Hz}$;

Lazerio ciklo laikas $Tp = \frac{V}{60} = \frac{20}{60} = 0,05 \text{ s}$;

2.2 lentelė. Bandinių paskesnio legiravimo CO₂ lazeriu režimai

Bandinio žymuo	Lazerio eigos greitis mm/min	Lazerio dėmės plotis, mm	Vienos dėmės energijos tankis, W/m ²	Perdengimo koeficientas, %	Apdorojimo pobūdis
A1	500	0.5	51,02 10 ⁷	82	Lydimas
A2	750	0.5		78	Lydimas
A3	1000	0.5		75	Lydimas
A4	1250	0.5		73	Lydimas
A5	1500	0.5		71	Lydimas
A6	500	2.0	3,18 10 ⁷	93	Lydimas
A7	750	2.0		90	Lydimas
A8	1000	2.0		88	Lydimas
A9	1250	2.0		86	Lydimas
A10	250	3.0	1,42 10 ⁷	97	Lydimas
A11	400	3.0		96	Lydimas
A12	500	3.0		95	Lydimas
A13	750	3.0		93	Lydimas
B1	500	0.5	51,02 10 ⁷	82	Lydimas+amorfinis boras
B2	750	0.5		78	Lydimas+amorfinis boras
B3	1000	0.5		75	Lydimas+amorfinis boras
B4	1250	0.5		73	Lydimas+amorfinis boras
B5	1500	0.5		71	Lydimas+amorfinis boras
B6	500	2.0	3,18 10 ⁷	93	Lydimas+amorfinis boras
B7	750	2.0		90	Lydimas+amorfinis boras
B8	1000	2.0		88	Lydimas+amorfinis boras
B9	1250	2.0		86	Lydimas+amorfinis boras

Tyrimo metu bandiniai buvo legiruojami skirtingais režimais. 2.4 pav. linijos bandinio šonuose nurodo lazerio paveikto paviršiaus vietą. Atliekant lazerinį bandinių paviršiaus apdorojimą su amorfiniu boru prieš apdorojimą lazeriu bandinių paviršiuje buvo suformuotas 1 mm storio sluoksnis iš amorfinio boro miltelių ir rišiklio (organinio stiklo).



2.4 pav. Bandinio lazerinio legiravimo schema

2.3.1 Optinė mikroskopija

Optinės mikroskopijos tyrimai atlikti analitiniu mikroskopu „Nikon“ MA200 , aprūpintu integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Mikrostruktūra tirta naudojant 5, 10, 20 ir 50 kartų didinimo objektyvus ir 10 kartų didinimo okuliarą..



2.5 pav. „Nikon MA200" mikroskopas

Metalografinėi analizei atlikti bandiniai buvo patalpinti į apvalią plastikine formą ir užlieti epoksidine derva. Mikrošlifai buvo ruošiami, pradžioje šlifuojant skirtingo grūdėtumo popieriumi nuo

P100 iki P2500. Nušlifavus paviršių didesnio grūdėtumo šlifavimo popieriumi, prieš šlifuojant smulkesniu popieriumi, šlifai buvo nuplaunami vandeniu. Galutinis tiriamų paviršių poliravimas buvo atliekamas, naudojant poliravimo pastas, kurių grūdėtumas nuo 3 iki 1 μm . Prieš pradėdant poliruoti šlifus poliravimo pasta, šlifai buvo plaunami izopropanoliu. Po poliravimo šlifai nuplauti etilo alkoholio tirpalu ir džiovinti karšto oro srove. Šlifų mikrostruktūra tirta dviem etapais: po poliravimo ir po ėsdinimo. Ėsdinimui buvo naudojamas tirpalas sudarytas iš šių elementų: vandens (1 dalis), acto rūgšties (1 dalis), druskos rūgšties (4 dalis) ir azoto rūgšties (1 dalis). Ėsdinimo trukmė 45 s. Optinės mikroskopijos būdu nustatytas lazerinės spinduliuotės paveikto ploto gylis, plotis bei mikrostruktūra.

2.3.2 Mikrokietumo matavimai

Tyrimo metu buvo atliktas bandinių perlydyto paviršiaus kietumo matavimas Vikerso metodu su 500 g. apkrova, išlaikant 15 s. Darbe pateikiami perlydytų paviršių kietumo aritmetiniai dydžiai apskaičiuoti prieš tai atmetus mažiausią ir didžiausią reikšmes iš 5 matavimų rezultatų.

Taip pat perlydytų sluoksnių mikrokietumo matavimai atlikti poliruotuose skersiniuose mikrošlifuose su „Zwick Roell ZH μ “ universaliu automatizuotu kietmačiu (matavimo paklaida 1 %). Matavimai atlikti Knopo metodu su 200 g apkrova išlaikant 15 s.

Darbe pateikiami perlydytų sluoksnių mikrokietumo aritmetiniai apskaičiuoti prieš tai atmetus mažiausią ir didžiausią reikšmes iš 5 matavimų rezultatų.



2.6 pav. „Zwick Roell ZH μ “ universalus automatizuotas kietmatis

2.3.3 Skenuojamoji elektroninė mikroskopija

Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos mokslo instituto Statybinių medžiagų laboratorijoje. Tyrimai atlikti „SEM JEOL JSM-7600F“ skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisu su antrinių elektronų SE detektoriumi (2.7 pav.).

Elektroninės mikroskopijos parametrai: greitinančioji įtampa 10 kV, atstumas iki bandinio paviršiaus 12 mm, padidinimas 2000 kartų, temperatūra 22 °C.

Sukepinti ir lazeriu apdoroti bandinių paviršiai tirti SEM būdu antrinių elektronų signalu. Bandinių paviršiai buvo chemiškai nuvalyti C_3H_8O tirpalu, norint pašalinti įvairius paviršiaus nešvarumus.



2.7 pav. „SEM JEOL JSM-7600F“ skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi

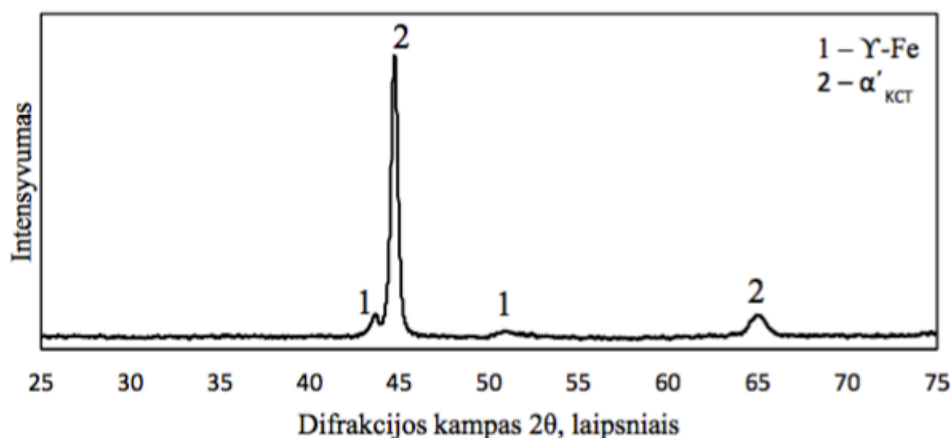
2.3.4 Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Miltelinio pagrindo sukepintam tūriui sudaryti panaudoti Fe-Ni-Co pagrindo milteliai (2.3 lentelė).

2.3 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis pagal gamintojo specifikaciją, masės %

Fe	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al	Cr
Likęs	0,03	iki 0,1	iki 0,1	17-19	4,8	iki 0,8	8,5-9,5	iki 0,1	iki 0,5

Selektyviojo lazerinio sukepimo miltelių rentgeno difrakcinės analizės metu buvo nustatyta, kad tiriamuosius miltelius sudaro martensitinė struktūra su KCT gardele ir liekamasis austenitas (2.8 pav.). Diagramoje matyti tik ryškios geležies ir geležies nikelio junginio smailės. Tačiau geležies kietasis tirpalas pasižymi didesne gardele, rodančia, kad tai gali būti Mo ir Co turintis junginys.



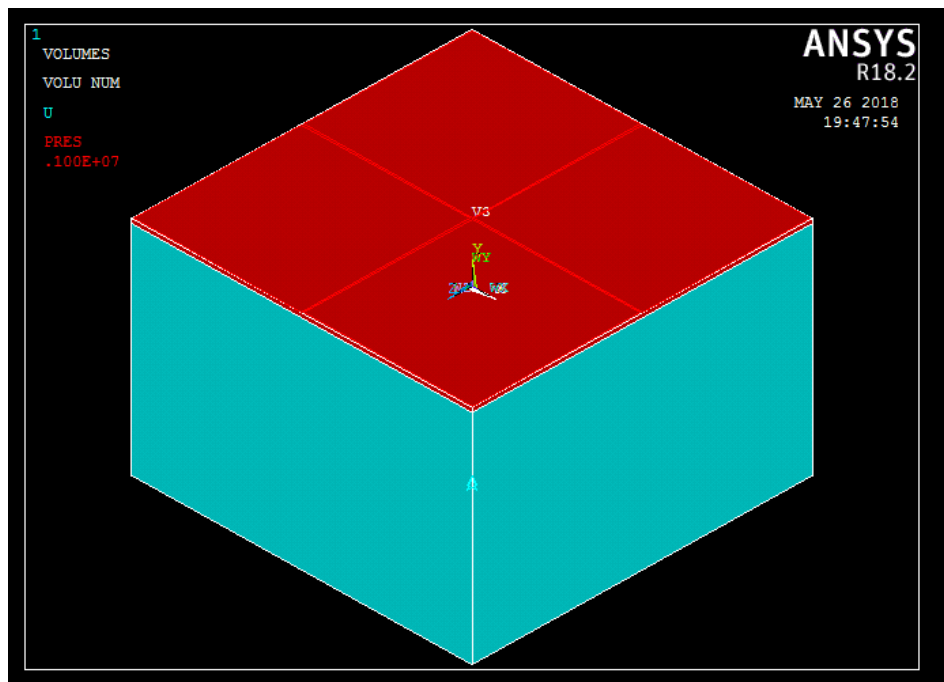
2.8 pav. Fe-Ni-Co miltelių rentgeno difrakcinė kreivė

2.4 Skaitinio modeliavimo metodika

Skaitinio modeliavimo metu buvo tiriamą sukepintų bandinių lazerinio apdorojimo šilumos mainai ir temperatūros pasiskirstymas apdorojimo metu. Tyrimui yra pasirinkta „Ansys Mechanical APDL 18.2" modeliavimo programa.

Pasirinktas bandinys - DIN 1.2709 plieno kūbas kurio matmenys: ilgis – 10 mm. plotis – 10 mm. aukštis – 15 mm.

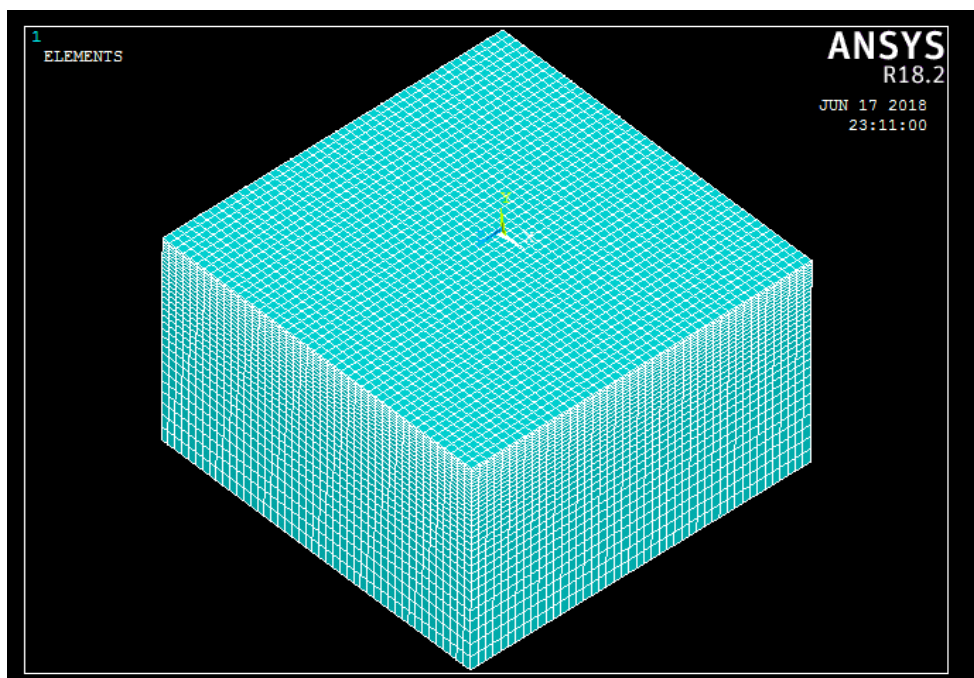
„ANSYS Mechanical APDL 18.2" darbo platformoje suprojektuojamas bandinio eskizas, (2.9 pav.) mėlyna spalva pažymėtas DIN 1.2709 sukepintas plieno kūbas, raudona spalva pažymėta amorfinio boro danga.



2.9 pav. Bandinio vaizdas „Ansys Mechanical APDL 18.2" platformoje

2.4.1 Šilumos srautų skaičiavimo baigtinių elementų būdu metodika

Erdvinis tiriamo objekto modelis buvo sudarytas iš 4 mazgų baigtinių elementų „Solid 278” (2.10 pav.).



2.10 pav. Erdvinis sukepinto bandinio modelis, sudarytas iš baigtinių elementų

Pagal pirmą termodinamikos dėsnį, šiluminė energija yra pastovi. Šilumos laidumo diferencialinė lygtis yra:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = Q, \quad (2.5)$$

čia ρ – medžiagos tankis, c – medžiagos šiluminė talpa, T – temperatūra, t – laikas,

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} - \text{vektorius operatorius, } \{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} - \text{šilumos mainų greičio vektorius,}$$

$\{q\}$ – šilumos srautas ploto vienetu, Q – šilumos šaltinis.

Ryšį tarp šilumos srauto ir temperatūros gradiento nusako Furjė dėsnis:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T, \quad (2.6)$$

$$\text{čia } [D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} - \text{šilumos laidumo matrica,}$$

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – elemento šilumos laidumas x, y ir z ašies kryptimi.

Iš (2.5 ir 2.6) lygčių:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D]\{L\}T) + Q, \quad (2.7)$$

Lygti (2.3) galima užrašyti taip:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.8)$$

Priimta, kad visi procesai vyksta Dekarto koordinačių sistemoje.

Priimamos tokios kraštinės sąlygos:

1. Temperatūra, proceso pradžioje veikianti elemento paviršiaus plotą:

$$T = T_0, \quad (2.9)$$

2. Suteikiamos šilumos srautas, veikiantis elemento paviršiaus plotą:

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q_0, \quad (2.10)$$

čia $\{\eta\}$ – vienetinis išorinis normalės vektorius.

3. Šiluminė konvekcija, veikianti elemento paviršiaus plotą (Niutono aušimo dėsnis):

$$\{q\}^T \{\eta\} = -h_p (T_{ap} - T), \quad (2.11)$$

čia $\{\eta\}$ – vienetinis išorinis normalės vektorius, h_p – šilumos perdavimo natūralios konvekcijos būdu koeficientas, T_{ap} – aplinkos temperatūra, T – kūno paviršiaus temperatūra.

Įvertinus (2.6) lygtį, (2.9) ir (2.10) lygtys užrašomos taip:

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = q_0, \quad (2.12)$$

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = h_p (T_{ap} - T), \quad (2.13)$$

Panaudojant virtualiosios temperatūros kitimą, (2.8) lygties integravimui įvedamas elemento tūris V ir, naudojant (2.13) – (2.14) lygtis, atliekama (2.8) lygties transformacija

$$\begin{aligned} \int_V \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(V) = \\ = \int_S \delta T q_0 d(S) + \int_S \delta T h_f (T_{ap} - T) d(S) + \int_V \delta T \times Q d(V) \end{aligned} \quad (2.14)$$

čia δT – leistina virtualioji temperatūra, V – elemento tūris.

Kintamoji temperatūra T priklauso nuo erdvinės padėties ir laiko funkcijos:

$$T = \{N\}^T \{T_e\}, \quad (2.15)$$

čia T – temperatūra,

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & 0 & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & 0 & N_8 \end{Bmatrix} - 8 \text{ mazgų elemento formos funkcija,}$$

$\{T_e\}$ – elemento mazgo temperatūros vektorius.

Temperatūros laiko išvestinė gali būti užrašoma taip:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \left\{ \dot{T}_e \right\}, \quad (2.16)$$

Virtualiosios temperatūros δT išraiška panaši į temperatūros T išraišką ir gaunama interpoliuojant elemento formos funkcijomis:

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\}, \quad (2.17)$$

Kombinaciją $\{L\} T$ galima užrašyti taip:

$$\{L\} T = [B] \{T_e\}, \quad (2.18)$$

čia

$$[B] = \{L\} \{N\}^T, \quad (2.19)$$

Įvertinus (2.15) – (2.19) formules, (2.14) lygties variacinė forma gali būti supaprastinta:

$$\begin{aligned} \int_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{N\}^T \left\{ \dot{T}_e \right\} d(V) + \int_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{v\}^T [B] \{T_e\} d(V) + \\ + \int_V \{\delta T_e\}^T \{B\}^T [D] [B] \{T_e\} d(V) = \int_S \{\delta T_e\}^T \{N\} q_0 d(S) + \\ + \int_S \{\delta T_e\}^T \{N\} h_p (T_{ap} - \{N\}^T \{T_e\}) d(S) + \int_V \{\delta T_e\}^T \{N\} Q d(V) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Primama, kad elemento medžiagos tankis ρ yra pastovus, o medžiagos šiluminė talpa c ir šilumos šaltinis Q gali keistis. Dydžiai $\{T_e\}$, $\{\dot{T}_e\}$ ir $\{\delta T_e\}$ yra elemento mazgų temperatūra ir kartu pastovieji elemento tūrio dydžiai. Todėl integrale jie gali būti panaikinti. Kadangi visos (2.20) lygties dalys yra padaugintos iš vektoriaus $\{\delta T_e\}$, šis vektorius paskutinėje lygtyje yra panaikinamas. (2.20) lygtį galima perrašyti taip:

$$\begin{aligned} & \rho \int_V c \{N\} \{N\}^T d(V) \{\dot{T}_e\} + \rho \int_V c \{N\} \{v\}^T d(V) \{T_e\} + \\ & + \int_V [B]^T [D] [B] d(V) \{T_e\} = \int_S \{N\} q_0 d(S) + \int_S T_{ap} h_p \{N\} d(S) - \\ & - \int_S h_p \{N\} \{N\}^T \{T_e\} d(S) + \int_V Q \{N\} d(V) \end{aligned} \quad (2.21)$$

(2.18) lygtį galima supaprastinti taip:

$$[C_e^t] \{\dot{T}_e\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]) \{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\}, \quad (2.22)$$

čia

$$[C_e^t] = \int_V \rho c_p(T) \{N\} \{N\}^T dV, \quad (2.23)$$

$$[K_e^{tm}] = \int_V [B]^T [D] [B] \{T_e\} dV, \quad (2.24)$$

$$[K_e^{tb}] = \int_S \{N\} [K'] \{N\}^T dS, \quad (2.25)$$

$$[K_e^{tc}] = \int_S h(T) \{N\} \{N\}^T dS, \quad (2.26)$$

$$\{Q_e^f\} = \int_S \{N\} q_0 dS, \quad (2.27)$$

$$\{Q_e^c\} = \int_S h(T) \{N\}^T \{N\} T_0 dS, \quad (2.28)$$

$$\{Q_e^g\} = [C_e^t] T_o. \quad (2.29)$$

2.4 lentelė. Plieno DIN-1.2709 charakteristikos, sukepinto bandinio šilumos mainų matematiniam apskaičiavimui

Medžiaga	Tankis δ , kg/m ³	Lydimosi taškas T, °C	Tampru mo modulis E, GPa	Puasono koef., ν	Linijinio plėtimosi koeficien tas α 1/K°	Savitoji šiluminė talpa C, J/kg	Šiluminis laidumas K, W/mK
DIN 1.2709 plienas	8100	1413	160	0,3	$10,3 \cdot 10^{-6}$	450	20°C - 14,2 500°C - 19,0 600°C - 21,0 1300°C - 28,6
Amorfinis boras	2340	2079			$6 \cdot 10^{-6}$	1293,5	27,4

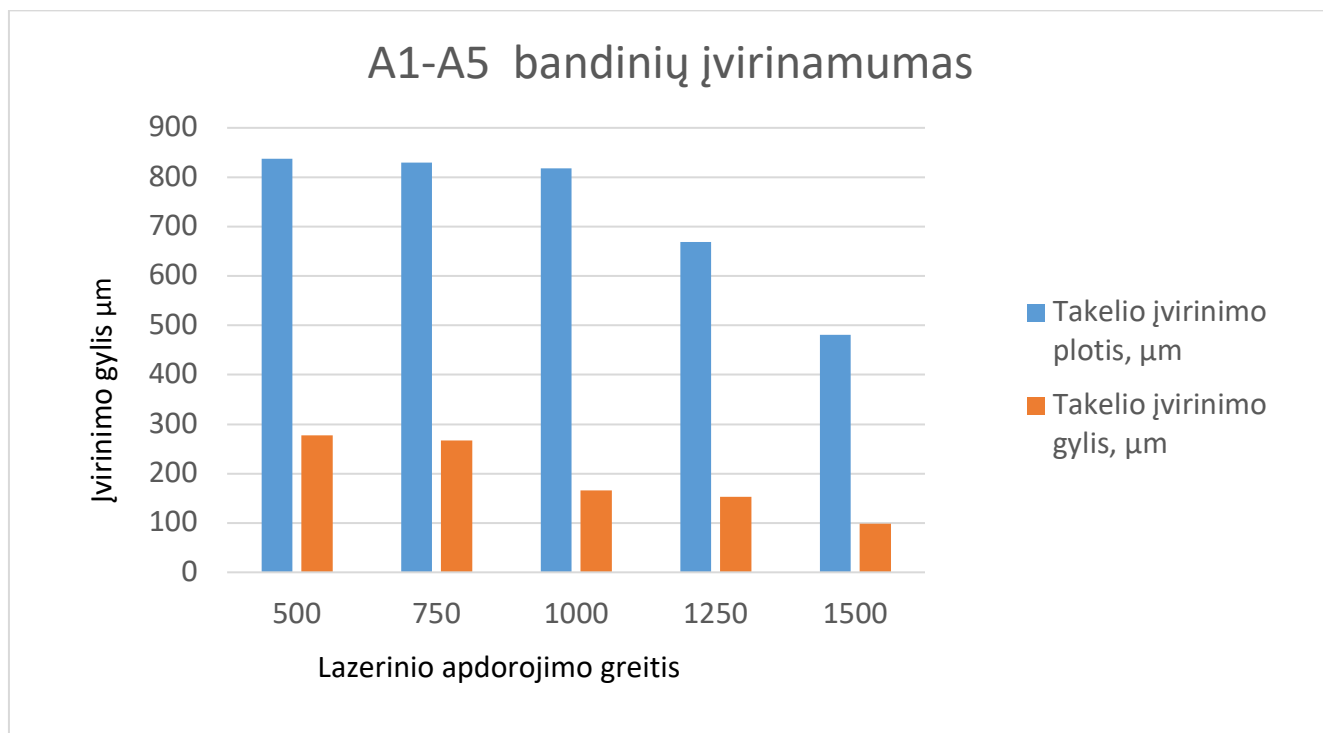
3 TYRIMO REZULTATAI

3.1 Įvirinamumo tyrimas

Taikant optinę mikroskopiją eksperimentinio tyrimo metu buvo atlikti sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių perlydyto metalo sluoksnio geometriniai tyrimai. Tyrimo metu buvo atliekami bandinių perlydyto paviršinio sluoksnio takelių įvirinimo gylio ir pločio tyrimai. Tyrimo rezultatai atliekant apdorojimą be priedų pateikti 3.1 lentelėje ir 3.1 grafike, o tyrimo rezultatai atliekant apdorojimą su amorfiniu boru pateikti 3.2 lentelėje ir 3.2 grafike.

3.1 lentelė. Takelių įvirinamumas be priedų

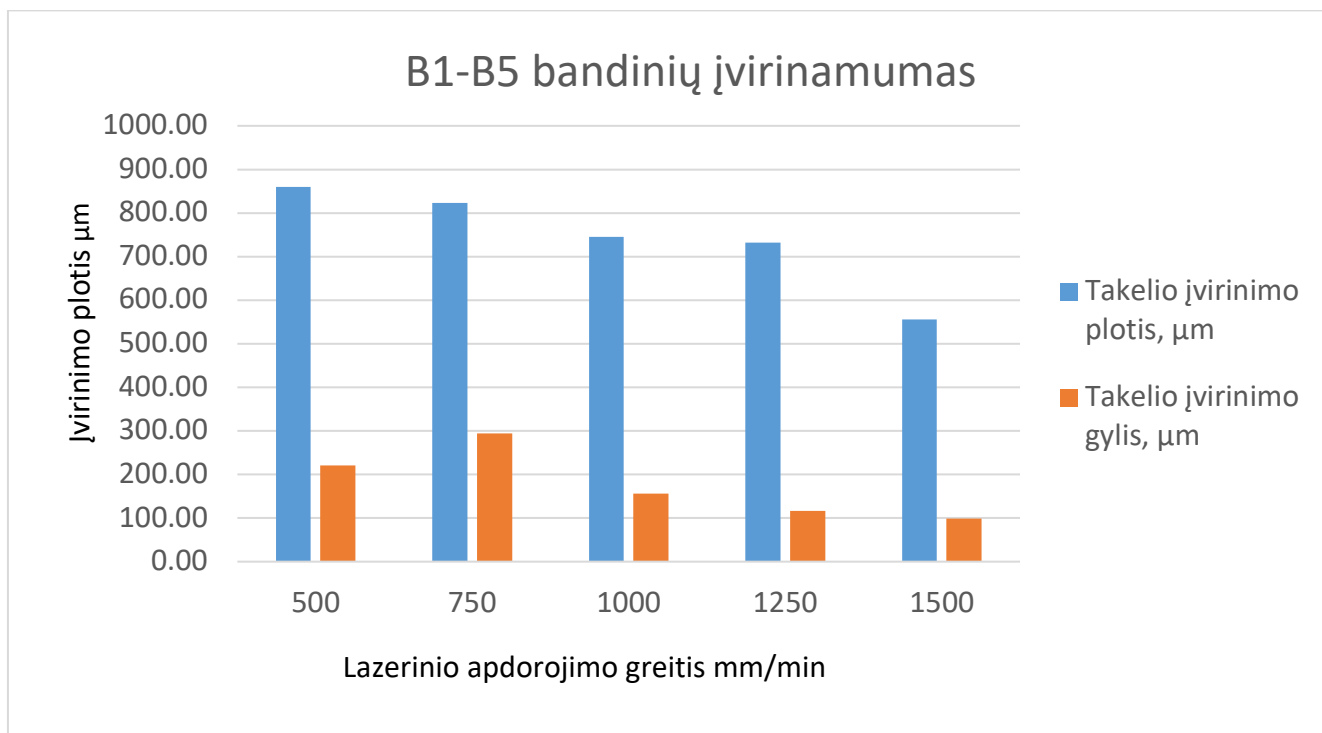
Šlifo žymuo	Lazerio eigos greitis mm/min	Lazerio dėmės skersmuo, mm	Apdorojimo pobūdis	Takelio įvirinimo plotis, μm	Takelio įvirinimo gylis, μm
A1	500	0.5	Lydimas	837,74	276,73
A2	750	0.5	Lydimas	830,19	266,67
A3	1000	0.5	Lydimas	817,61	166,04
A4	1250	0.5	Lydimas	669.18	153,46
A5	1500	0.5	Lydimas	480.50	98,11
A6	500	2.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A7	750	2.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A8	1000	2.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A9	1250	2.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A10	250	3.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A11	400	3.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A12	500	3.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
A13	750	3.0	Lydimas	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas



3.1 pav. A1 – A5 bandinių įvirinamumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant 0,5 mm lazerio dėmei

3.2 lentelė. Takelių įvirinamumas į bandinį padengus amorfiniu boru

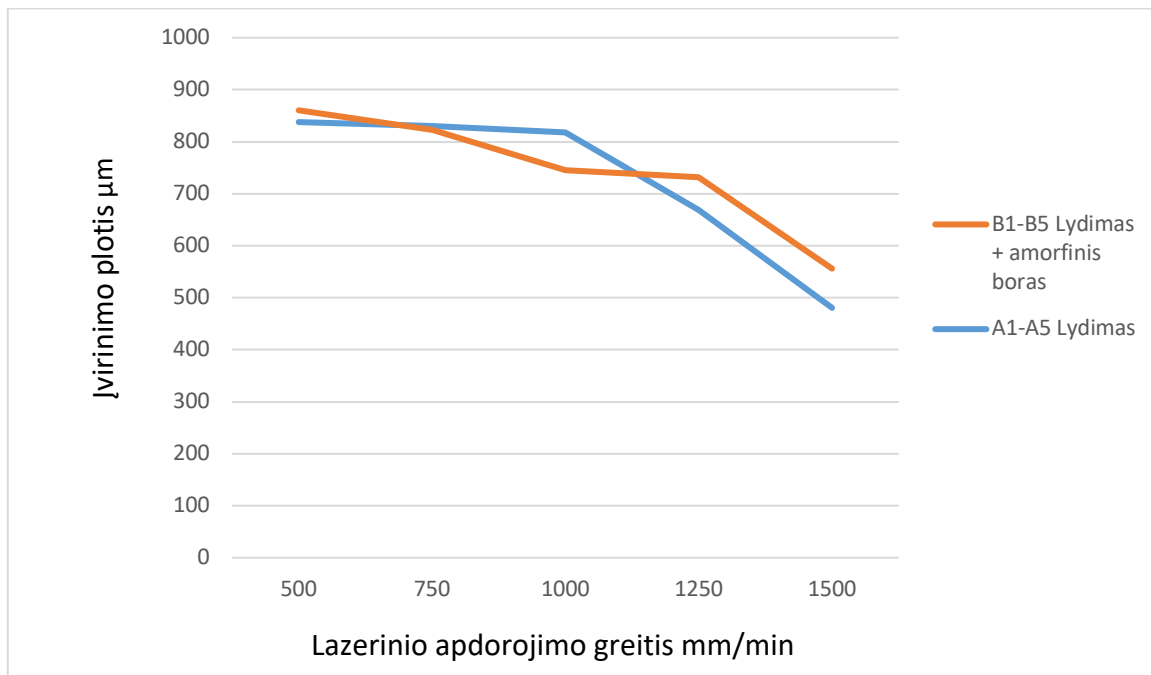
Bandinio žymuo	Lazerio eigos greitis mm/min	Lazerio dėmės skersmuo, mm	Apdorojimo pobūdis	Takelio įvirinimo plotis, μm	Takelio įvirinimo gylis, μm
B1	500	0.5	Lydimas+ am. b.	860,38	294.34
B2	750	0.5	Lydimas+ am. b.	822,64	221.34
B3	1000	0.5	Lydimas+ am. b.	744,65	155,97
B4	1250	0.5	Lydimas+ am. b.	732,08	116.98
B5	1500	0.5	Lydimas+ am. b.	555,97	98,11
B6	500	2.0	Lydimas+ am. b.	2040,25	80,50
B7	750	2.0	Lydimas+ am. b.	1911,95	45,28
B8	1000	2.0	Lydimas+ am. b.	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas
B9	1250	2.0	Lydimas+ am. b.	Nepastebėtas įvirinimas	Nepastebėtas įvirinimas



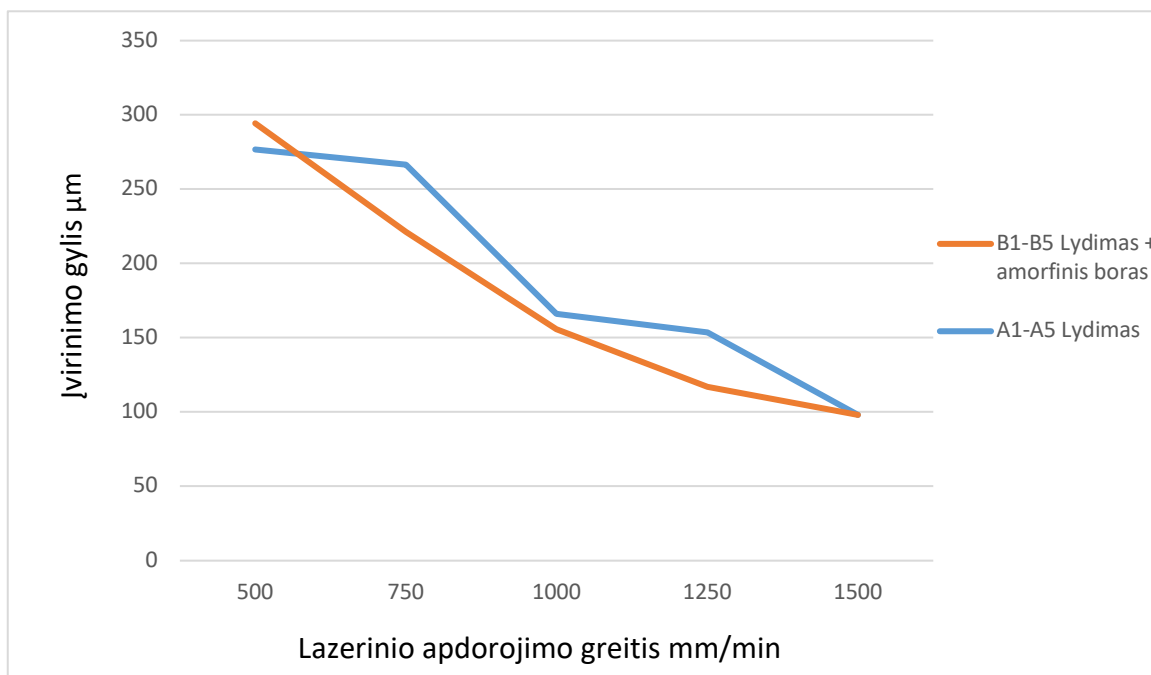
3.2 pav. B1 – B5 bandinių įvirinamumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant 0,5 mm lazerio dėmei

Atliekant SLS sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių perlydyto metalo be priedų ir su amorfiniu boru sluoksnių geometrinius mikrotyrimus nustatyta, kad didinant lazerinio apdorojimo greitį takelio plotis mažėja. Ryškesnis mažėjimas yra pastebimas kai apdorojimo greitis yra didinamas nuo 1250 iki 1500 mm/min. Takelio įvirinimo gylis priklausomybė yra analogiška atliekant perlydymą be priedų ir mažiausias įvirinimo gylis yra pasiekiamas esant 1500 mm/min ir siekia 98,11 μm. Atliekant sukepintų bandinių perlydymą su amorfiniu boru ir didinant lazerinio apdorojimo greitį takelių įvirinimo gylis bendra tendencija yra mažėjanti, o mažiausias įvirinimo gylis yra pasiekiamas esant 750 mm/min apdorojimo greičiui, lazerio dėmei 3,0 mm ir siekia 42,77 μm.

Analizuojant perlydyto be priedų ir su amorfiniu boru sluoksnio takelio įvirinimą galima teigti, kad amorfinio boro įtakos takelio pločiui ir gyliui nėra (3.3-3.4 pav.)



3.3 pav. Takelių įvirinimo pločio (μm) priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (lazerio dėmė 0,5 mm)



3.4 pav. Takelių įvirinimo gylis (μm) priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (lazerio dėmė 0,5 mm)

3.2 Kietumo tyrimo rezultatai

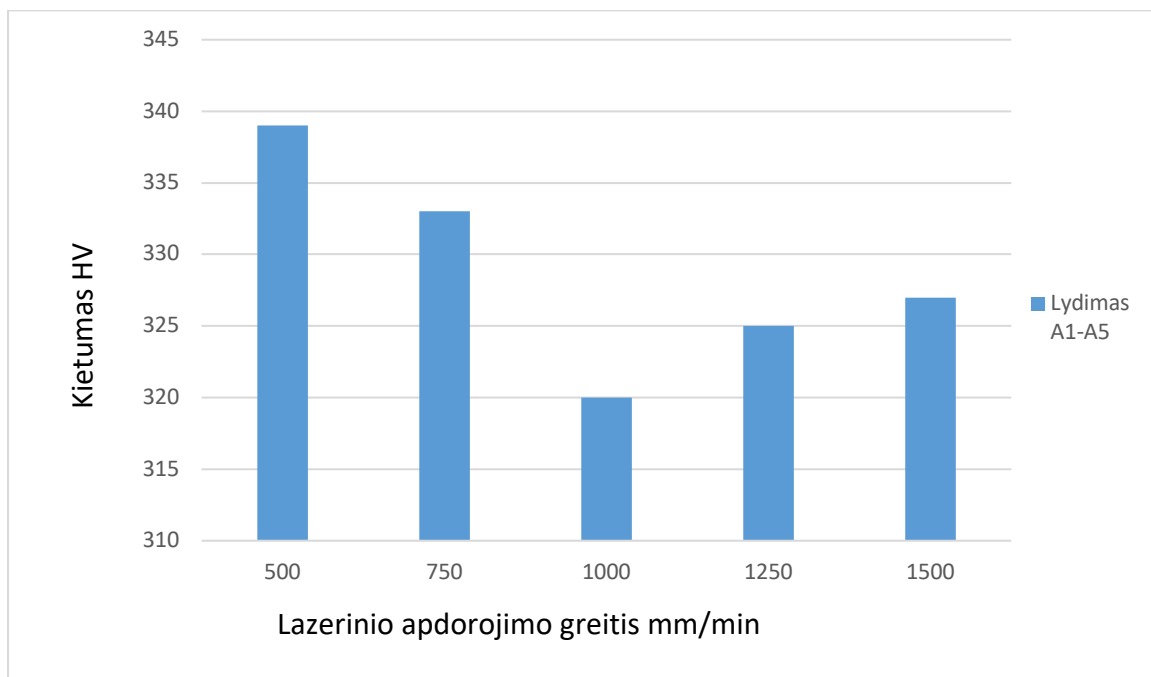
Tyrimo metu buvo atliktas bandinių perlydyto paviršiaus kietumo matavimas Vickerso metodu su 500 g. apkrova, išlaikant 15 s. Darbe pateikiami perlydytų paviršių kietumo aritmetiniai dydžiai apskaičiuoti prieš tai atmetus mažiausią ir didžiausią reikšmes iš 5 matavimų rezultatų.

Sukepinto SLS budu ir lazeriu neapdoroto bandinio kietumas siekia 362 HV. Sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių takelių paviršių kietumo tyrimo rezultatai pateikti 3.3-3.4 lentelėse. Analizuojant tyrimo rezultatus galima pastebėti, kad atliekant lazerinį apdorojimą sukepintų ir lazeriu apdorotų be priedų bandinių takelių paviršių kietumo reikšmės praktiškai nesikeičia ir svyruoja nuo 320 iki 339 HV priklausomai nuo apdorojimo greičio.

Tuo tarpu atliekant sukepintų bandinių perlydymą su amorfiniu boru kietumas yra ženkliai didesnis ir siekia 1334 HV. Didinant lazerinio apdorojimo greitį nuo 500 iki 1250 mm/min takelių kietumas stipriai didėja, ypač kai lazerio dėmė 2,0 mm.

3.3 lentelė. Vickerso kietumo matavimo rezultatai bandiniuose be pridėtinių medžiagų

Bandinio žymuo	Vickerso kietumas	Vickerso kietumo vidurkis
A1	322 360 310 365 336	339
A2	314 318 365 327 342	333
A3	302 340 318	320
A4	314 322 340 195	325
A5	345 306 331	327

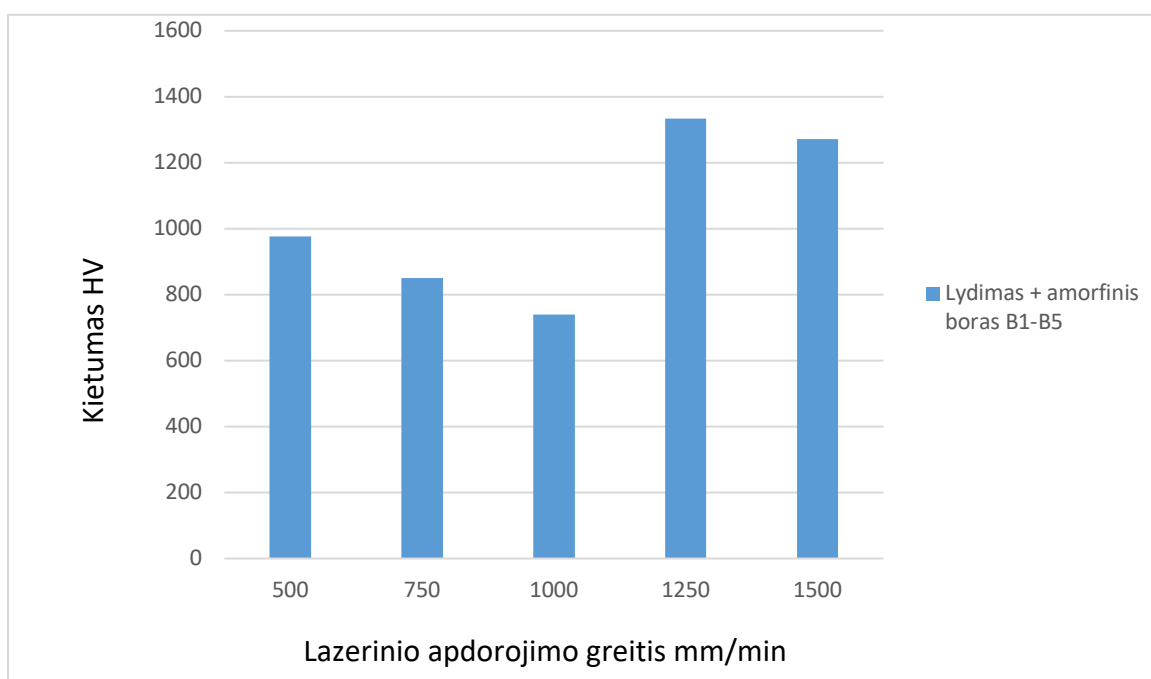


3.5 pav. A1-A5 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 0.5 mm

3.4 lentelė. Vickerso kietumo matavimo rezultatai bandiniuose su amorfiniu boru

B1	507 535 1471 1395	977
B2	938 606 925 935 795	851
B3	795 745 638 785	740
B4	1259 1514 1179 1385	1334
B5	1280 1142 1445 1218	1271
B6	492 530 502 530	513

B7	1040 839 699 1259	959
B8	966 980 1025 995	992
B9	1073 1106 1025 1142	1086

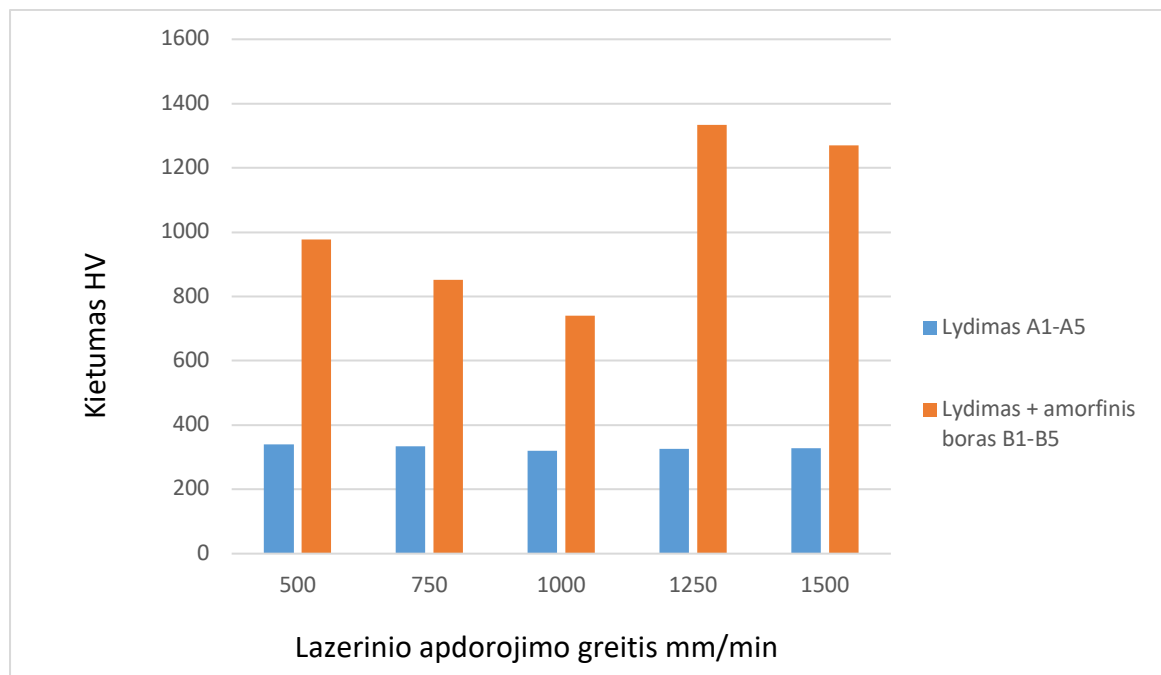


3.6 pav. B1-B5 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 0.5 mm

Atlikus bandinių mikrokietumo tyrimą buvo nustatyta, kad abiem atvejais (perlydymas be boro ir perlydymas su boru, kai lazerio dėmės plotis 0.5 mm) didinant lazerinio apdorojimo greitį nuo 500 iki 1500 mm/min vidutinis metalo mikrokietumas iš pradžių mažėja ir mažiausia reikšmę pasiekia prie 1000 mm/min, o po to vėl didėja. Amorfinio boro panaudojimas perlydymo metu leido padidinti vidutinį mikrokietumą iki 4 kartų (apie 1300HV).



3.7 pav. B6-B9 bandinių takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio, lazerio dėmės plotis 2.0 mm



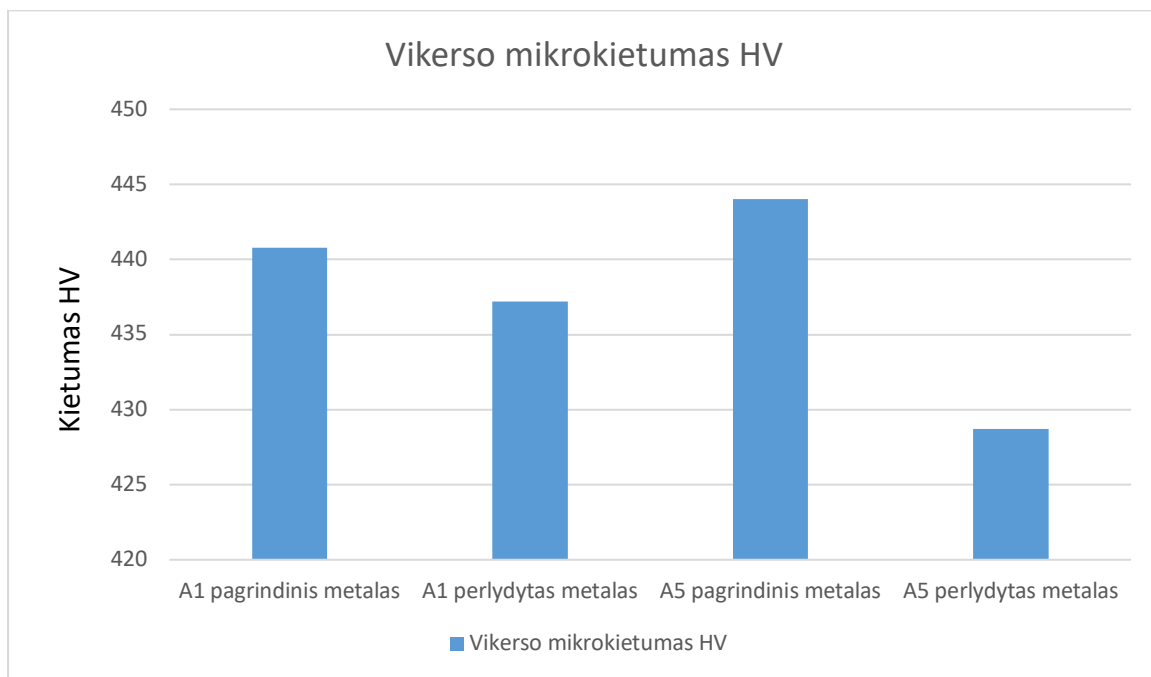
3.8 pav. Palyginamoji takelių paviršių Vickerso kietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio (bandiniai A1 – A5 ir B1 – B5, lazerio dėmės plotis 0.5 mm)

3.3 Mikrokietumo tyrimo rezultatai

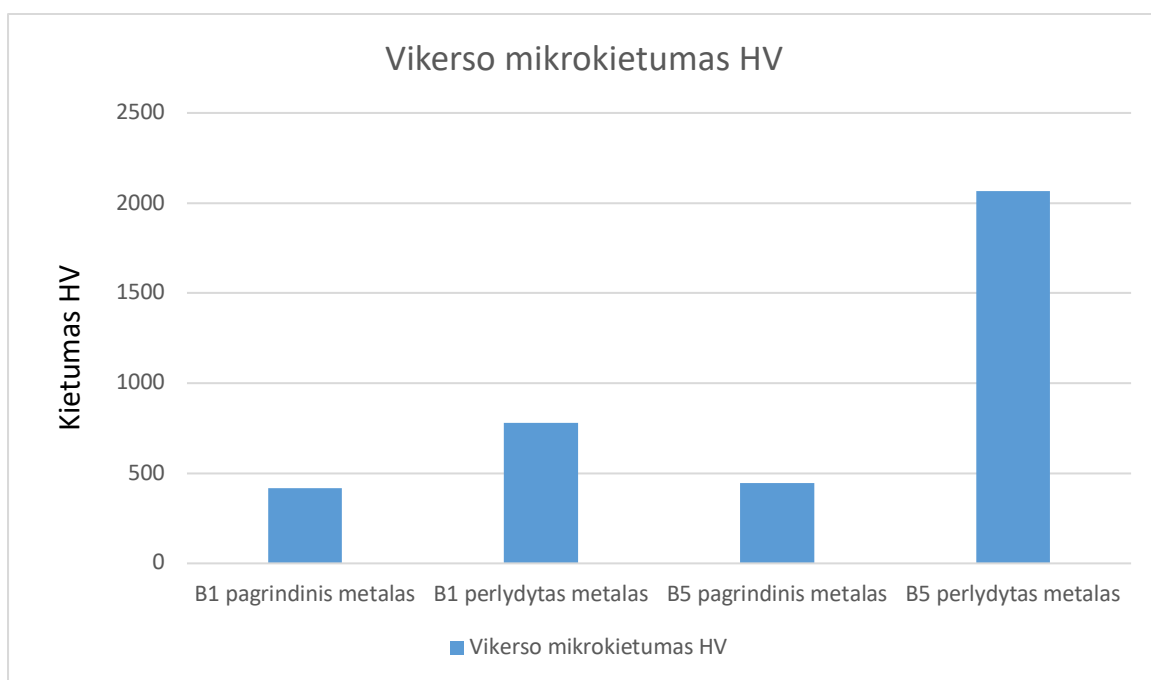
Siekiant įvertinti sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių paviršiaus eksploatacines savybes buvo atlikti bandinių mikrokietumo tyrimai taikant Knoopo metodą. Tyrimo metu buvo atliekami bandinių paviršinio sluoksnio ir pagrindinio metalo mikrokietumo matavimai nuo 2 iki 5 taškų skersiniuose mikrošlifuose. Tyrimo rezultatai pateikti 3.5 lentelėje. Mikrokietumo tyrimo vidurkiai pateikti 3.6 lentelėje ir 3.9-3.10 grafikuose.

3.5 lentelė. Sukepintų ir lazeriu apdorotu bandinių mikrokietumo tyrimo rezultatai

Bandinio žymuo	Dydis horizontalioji H, μm	Knoopo kietumas horizontalioji HK	Dydis vertikalios V, μm	Knupo kietumas vertikalioji HK	Vikerso mikrokietumas HV	Vikerso mikrokietumo vidurkiai HV
A1 perlydytas metalas	87.8	369	11.8	20592	362	437,2
	80.1	444	15.8	11363	427	
	76.0	492	12.7	17755	469	
	76.5	487	12.7	17755	464	
	76	492	12.7	17755	464	
A1 pag. metalas	81	434	13.1	16552	419	440,8
	78.3	464	15.4	12042	445	
	76.9	481	14	14485	459	
	79.2	454	13.1	16552	436	
	78.3	464	12.7	17755	445	
A5 perlydytas metalas	79.6	449	13.6	15467	431	428.7
	81.4	429	12.7	17755	415	
	78.7	459	12.2	19095	440	
A5 pag. metalas	80.1	444	11.3	22272	427	444
	81.9	424	11.3	22272	411	
	75.6	498	12.2	19095	474	
	76.5	487	12.7	17755	464	
B1 perlydytas metalas	61.1	763	10.4	26314	730	779,5
	59.3	810	10.4	26314	785	
	58.4	835	10.9	24167	818	
	59.3	810	10.4	26314	785	
B1 pag. metalas	77.8	470	12.7	17755	449	418,5
	82.4	420	13.6	15467	407	
	83.3	411	13.6	15467	399	
	81.0	434	13.1	16552	419	
B5 perlydytas metalas	37.1	2067	5.4	96668	2067	2067
	37.1	2067	5.4	96668	2067	
B5 pag. metalas	76.0	492	12.7	17755	469	444
	74.7	511	12.7	17755	484	
	80.5	439	12.7	17755	424	
	83.3	411	12.2	19095	399	



3.9 pav. Vickerso mikrokietumo vidurkių grafikas perlydytuose A serijos bandiniuose



3.10 pav. Vickerso mikrokietumo vidurkių grafikas perlydytuose B serijos bandiniuose su amorfiniu boru

Atliekant sukeptųjų bandinių perlydytųjų sluoksnių mikrokietumo tyrimą pastebėta, kad atliekant perlydymą be priedų perlydyto sluoksnio mikrokietumas nežymiai sumažėjo (palyginus su pagrindiniu metalu). Perlydant sukeptuosius bandinius su amorfiniu boru apdoroto metalo

mikrokietaumas ženkliai padidėjo nuo 2 iki 5 kartų lyginant su pagrindiniu metalu ir iki 4 kartų lyginant su perlydytu sluoksniu be priedų.

3.6 lentelė. Tirtų bandinių mikrokietaumo vidurkiai

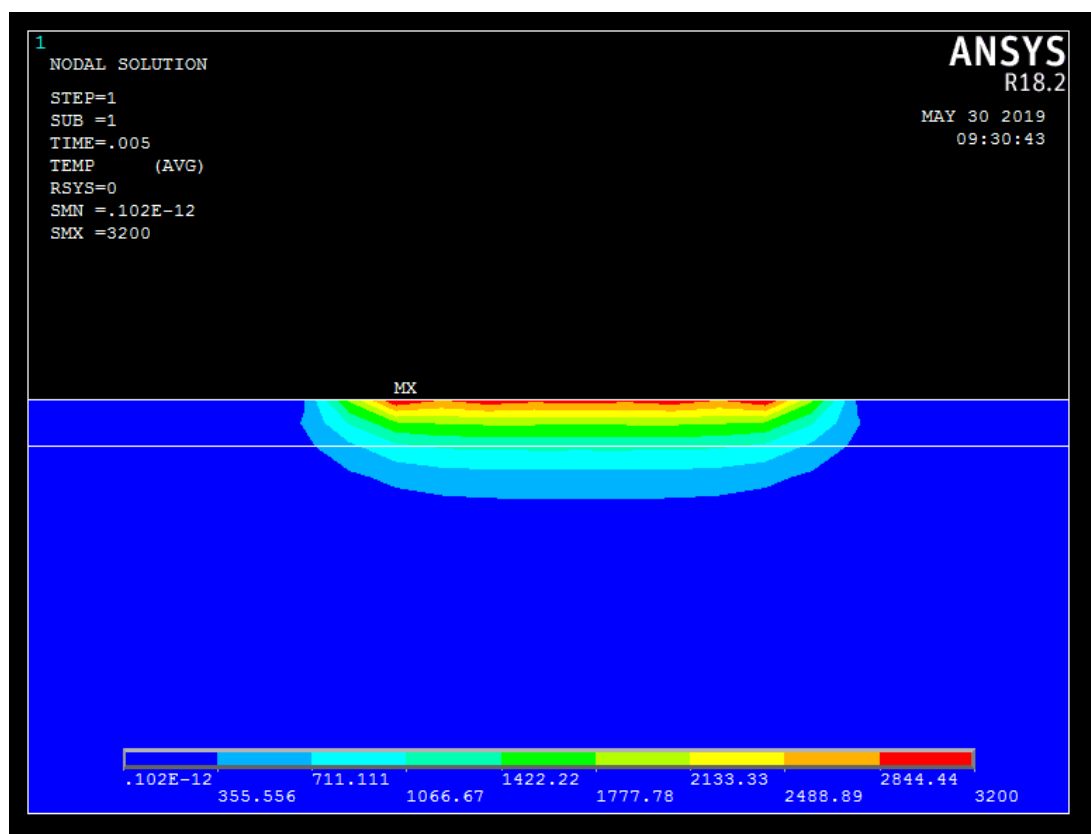
Bandinio žymuo	Dydis horizontalioji H, μm	Knupo kietaumas horizontalioji HK	Dydis vertikalios V, μm	Knupo kietaumas vertikalioji HK	Vikerso kietaumas HV
A1	79,28	456,80	13,14	17044	437,20
A1 Pagrindinis metalas	78,74	459,40	13,66	15477	440,80
A2	70,86	568,80	13,58	15604	537,40
A2 Pagrindinis metalas	81,23	432,50	12,10	19554	417,50
A3	81,43	436,00	12,83	17610	419,33
A3 Pagrindinis metalas	81,65	427,50	12,15	19726	414,50
A4	72,05	552,50	13,48	16034	523,25
A4 Pagrindinis metalas	78,63	463,25	12,58	18090	444,00
A5	79,90	445,67	12,83	17439	428,67
A5 Pagrindinis metalas	78,53	463,25	11,88	9323	444,00
B1	59,53	804,50	10,53	25777	779,50
B1 Pagrindinis metalas	81,13	433,75	13,25	16310	418,50
B5	37,10	2067,00	5,40	96668	2067,00
B5 Pagrindinis metalas	78,63	463,25	12,56	18090	444,00

3.4 Skaitmeninio modeliavimo tyrimas

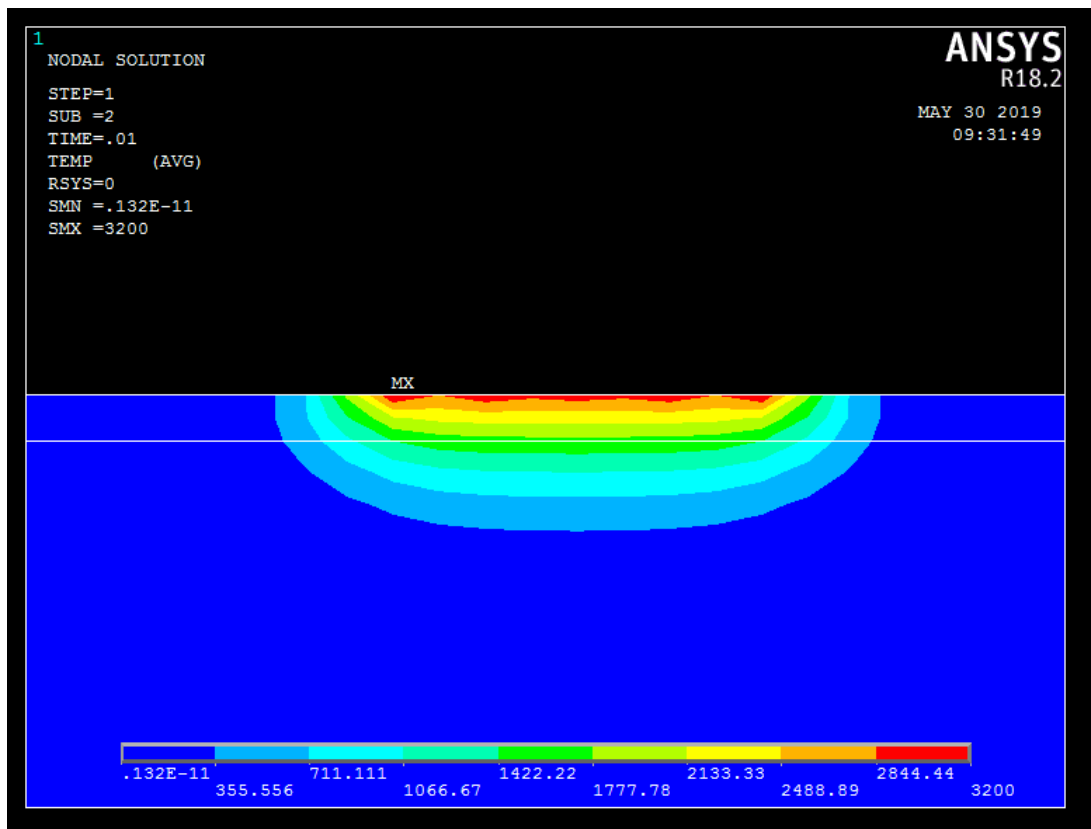
SLS sukeptintų bandinių lazerinio apdorojimo proceso šilumos mainų matematinis modeliavimas buvo atliktas, atsižvelgiant į medžiagos savybių (šiluminio laidumo) priklausomybę nuo temperatūros. Sprendžiant temperatūrinių laukų kitimo kietajame kūne uždavinius didžiulę įtaką turi kontakto vietų šilumos mainų procesai. Paviršiaus šilumos perdavimo natūraliosios konvekcijos būdu koeficientas, nulemia detalės temperatūros laukų pasiskirstymą.

Temperatūros laukų pasiskirstymas sukeptinto bandinio lazerinio apdorojimo metu kai yra atliekamas lydymas be priedų pateiktas 3.11-3.14 paveiksluose, o temperatūros laukų pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu kai yra atliekamas lydymas su amorfiniu boru pateiktas 3.15-3.18 paveiksluose.

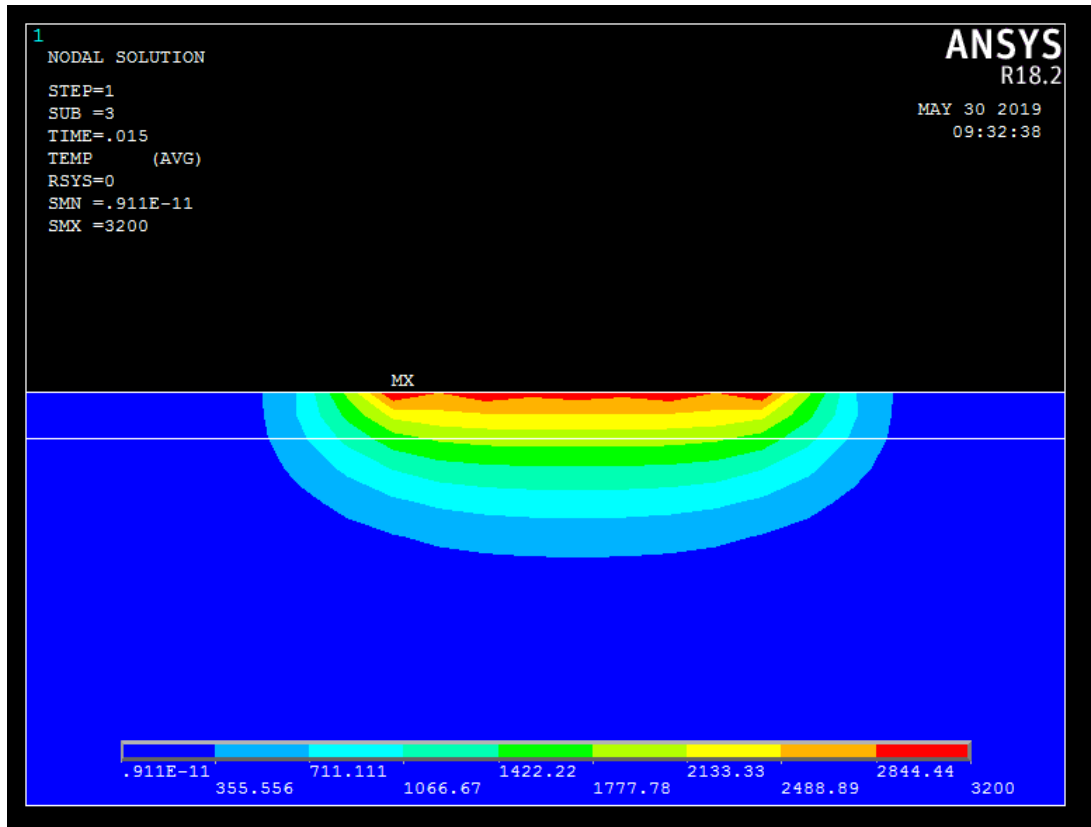
Skaitinio modeliavimo tyrimo rezultatai parodė, kad reikalingas lazerio impulso poveikio laikas yra 20 ms. Esant šiam lazerio poveikio laikui yra užtikrinamas amorfinio boro 1 mm storio sluoksnio visiškas perlydymas. Atliekant perlydymą be priedų 20 ms lazerio impulso poveikio laikas leidžia pasiekti teorinį bandinio paviršinio sluoksnio perlydymą iki 1,5 mm.



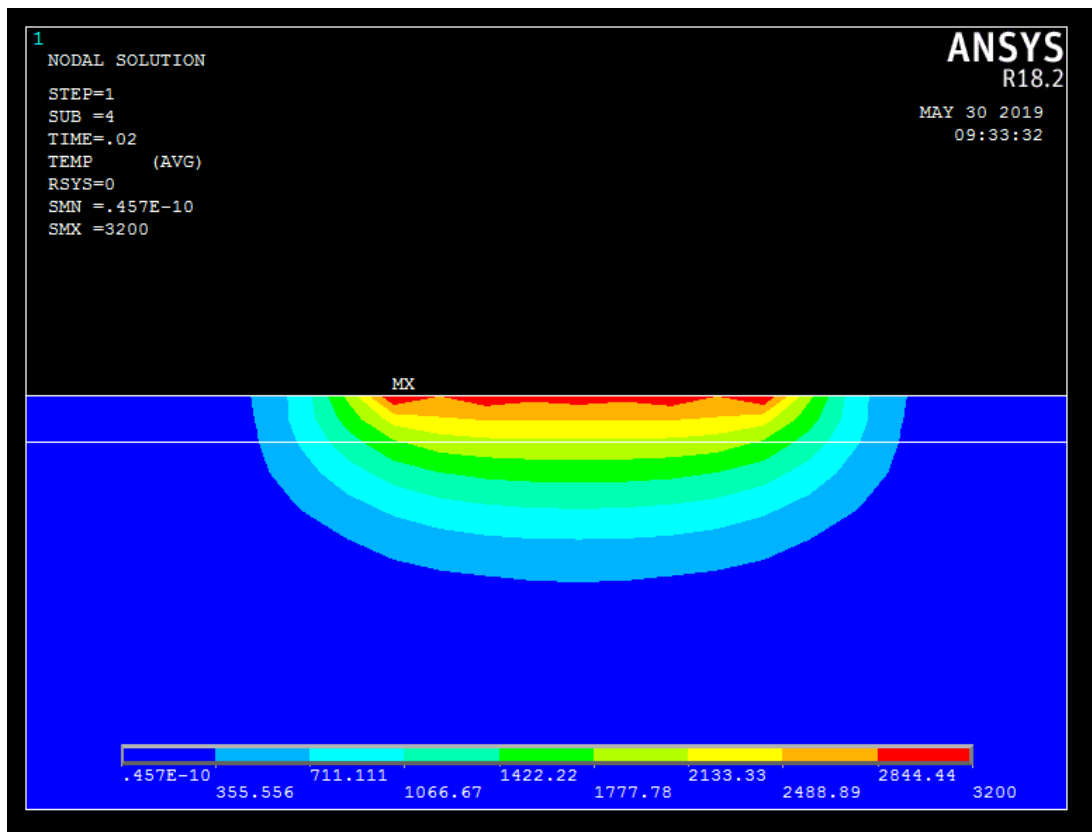
3.11 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,005 s)



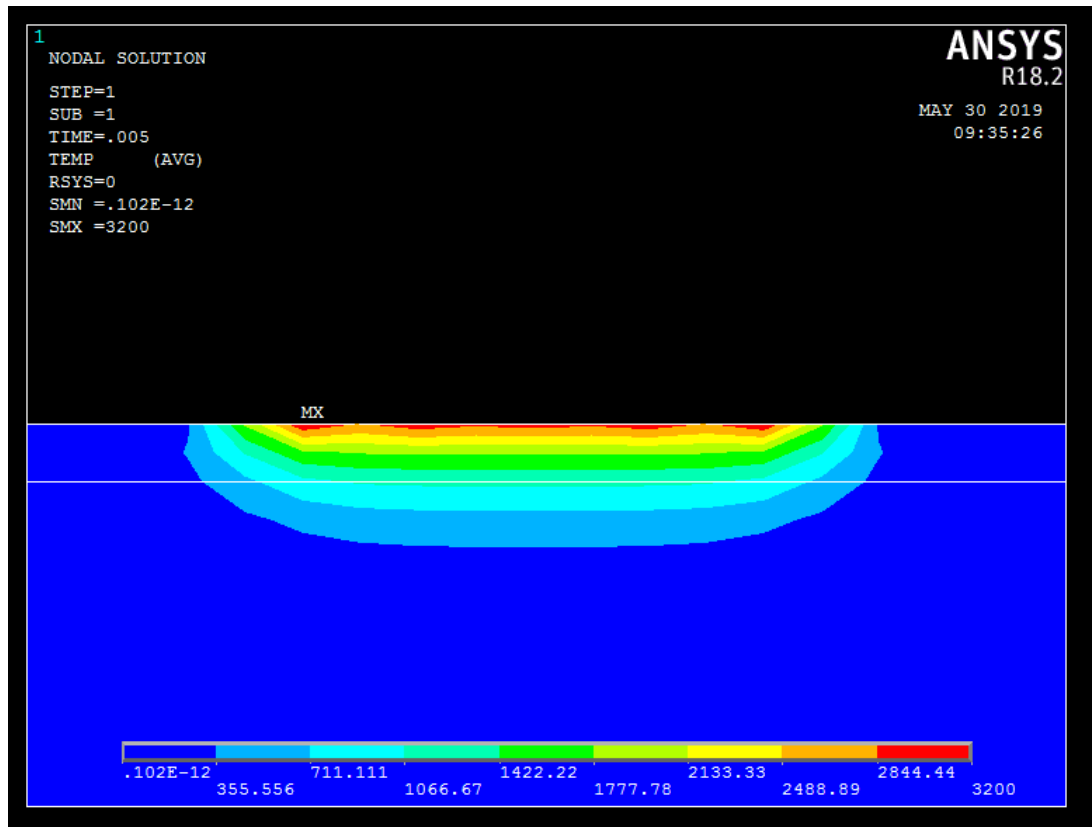
3.12 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,01 s)



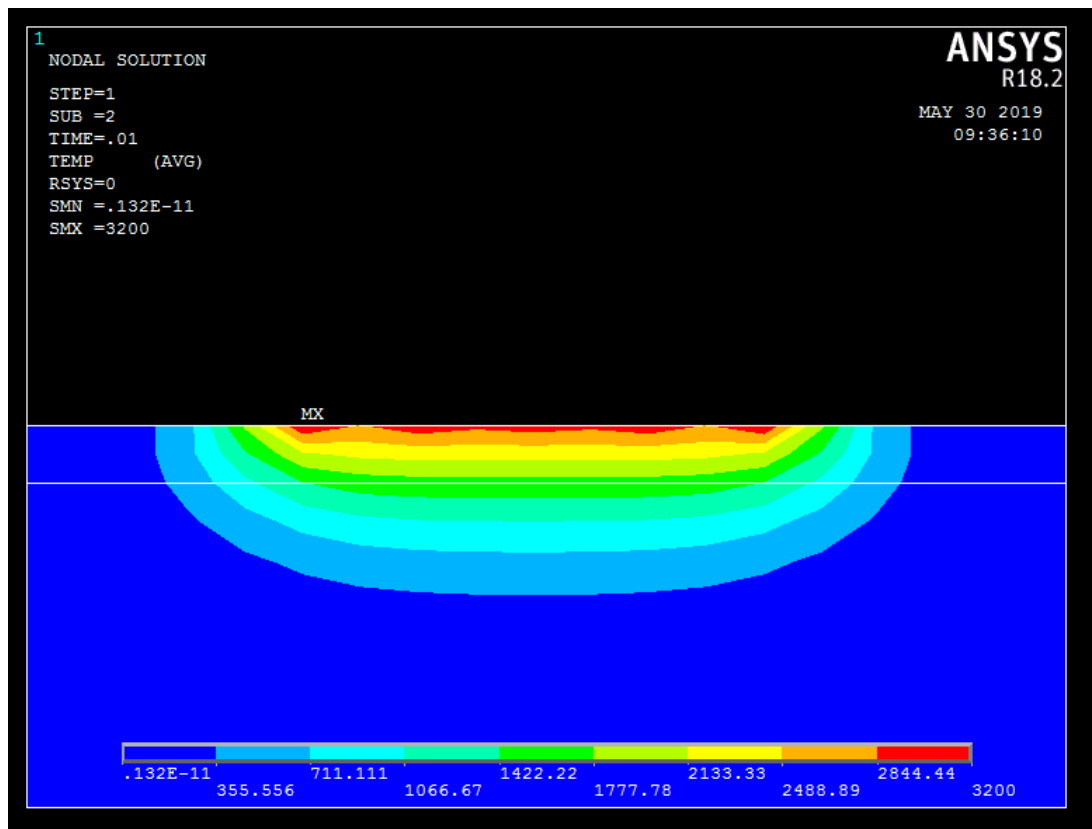
3.13 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,015 s)



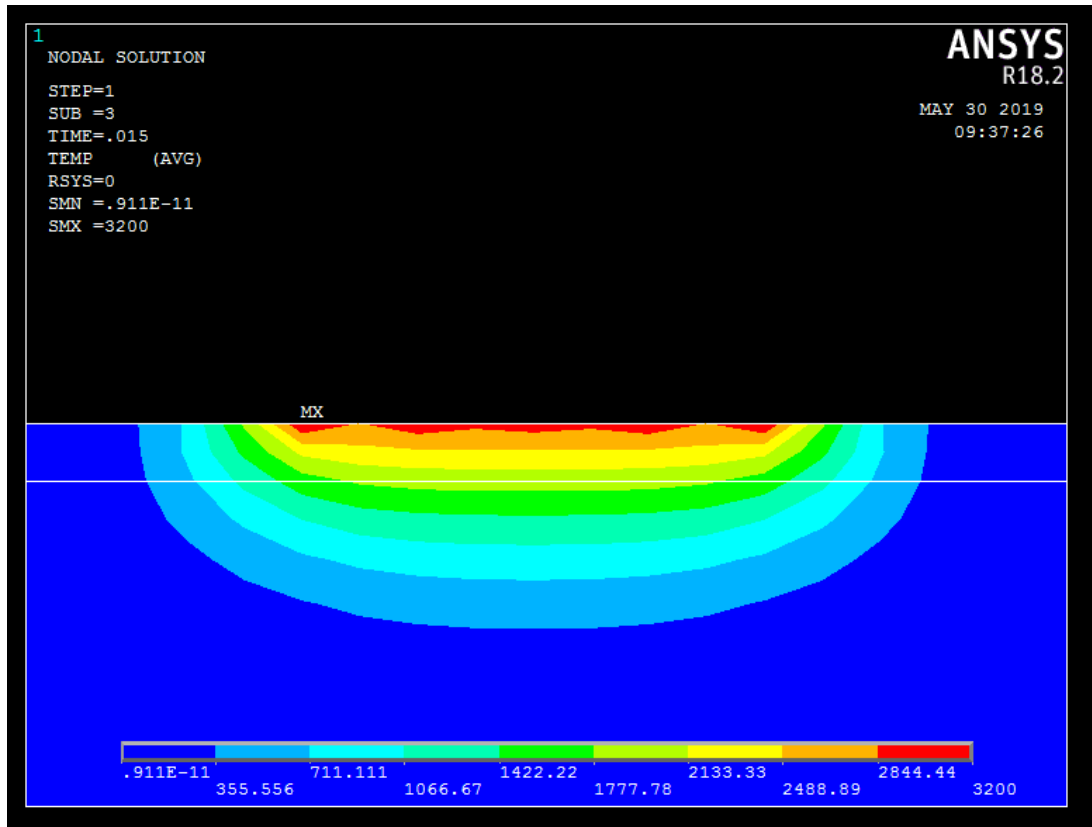
3.14 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas be priedų, lazerio poveikio laikas 0,02 s)



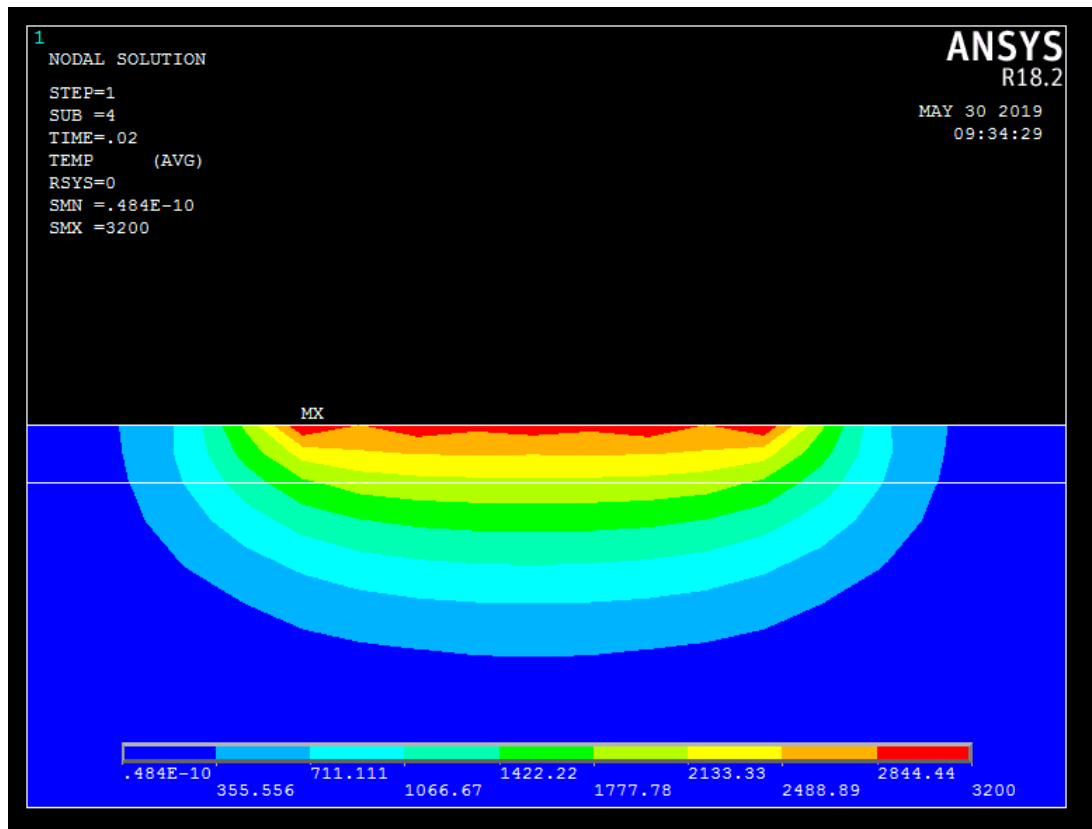
3.15 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,005 s)



3.16 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,01 s)



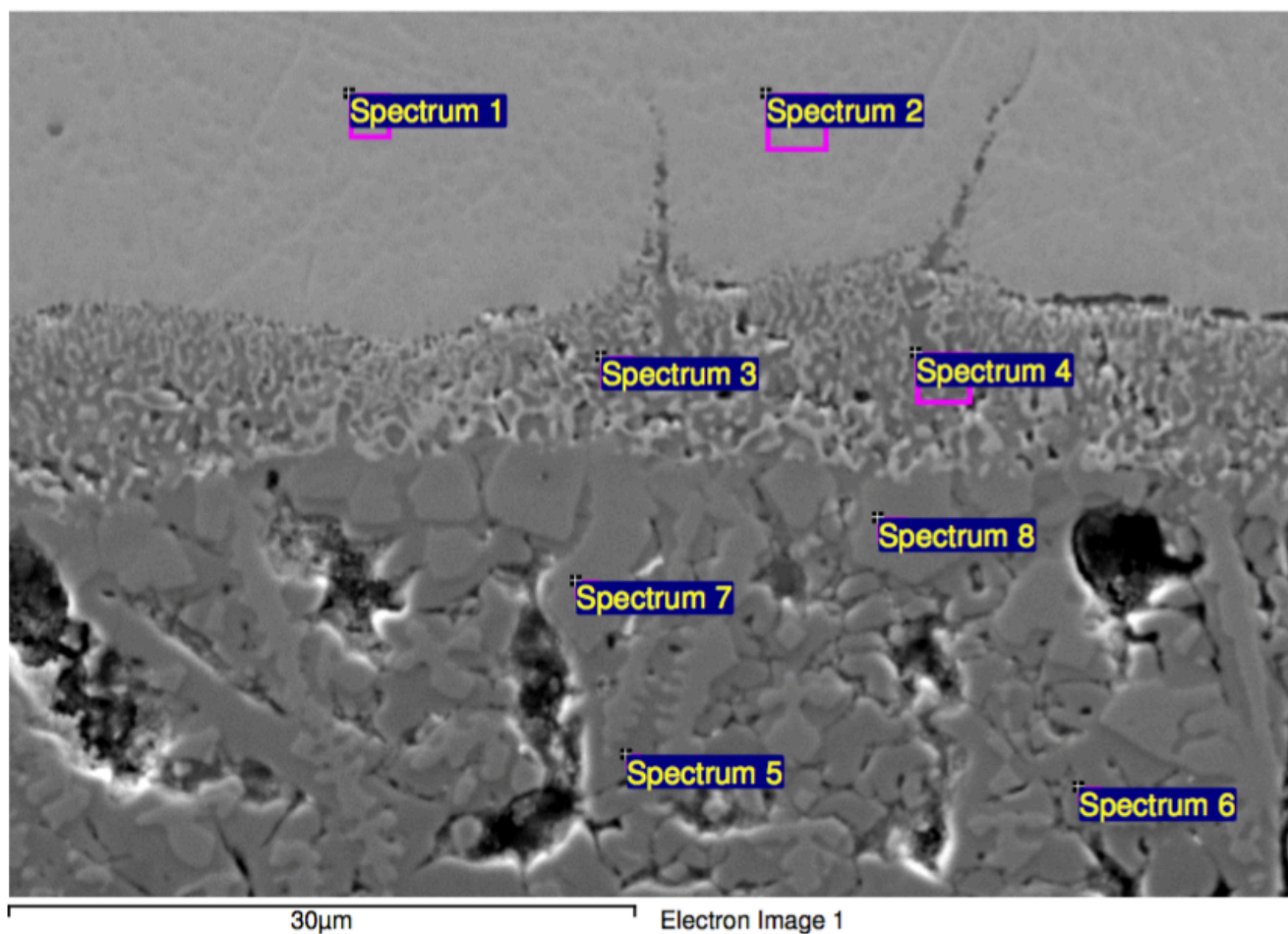
3.17 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,015 s)



3.18 pav. Temperatūros laukų (°C) pasiskirstymas bandinio lazerinio apdorojimo metu (lydimas su amorfiniu boru, lazerio poveikio laikas 0,02 s)

3.5 Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimas

Atliekant SLS budu sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių (su amorfiniu boru) rentgeno spindulių difrakcijos tyrimą buvo nustatyta, kad pagrindinio metalo cheminė sudėtis atitinka plieno DIN 1.2709 cheminei sudėčiai (3.19 pav. 1 ir 2 taškai). Padidinta deguonies kiekį metale galima paaiškinti metalo paviršinio sluoksnio daline oksidacija bandinių sukepinimo metu. Chromo kiekio mažesnę koncentraciją nei bazinio plieno galima paaiškinti rentgeno spindulių difrakcijos tyrimo paklaida atsirandančia dėl labai mažo chromo kiekio.



3.19 pav. Bandinio su pridėtinu boru sulydimo linijos SEM nuotrauka

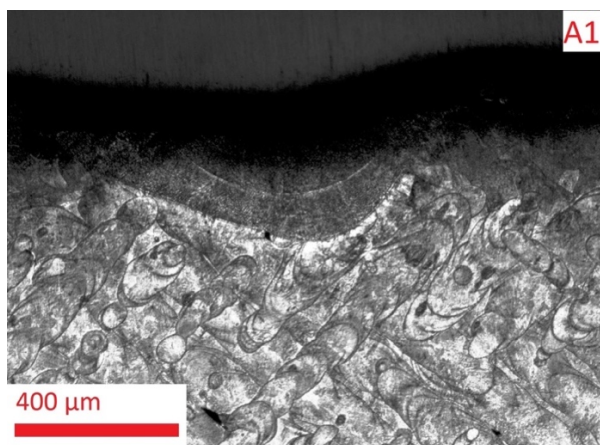
Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimo metu buvo nustatyta, kad perlydyto su amorfiniu boru sluoksnio metalo cheminė sudėtis pasižymi dideliais deguonies ir chromo kiekiais iki 21 % ir 30 % atitinkamai. Tai galima paaiškinti, kad sukepintų bandinių lazerinio apdorojimo metu bandinio paviršiuje galimai formuojasi chromo oksidai ir boridai.

3.7 lentelė bandinio su boru sulydymo ribos cheminės analizės rezultatai

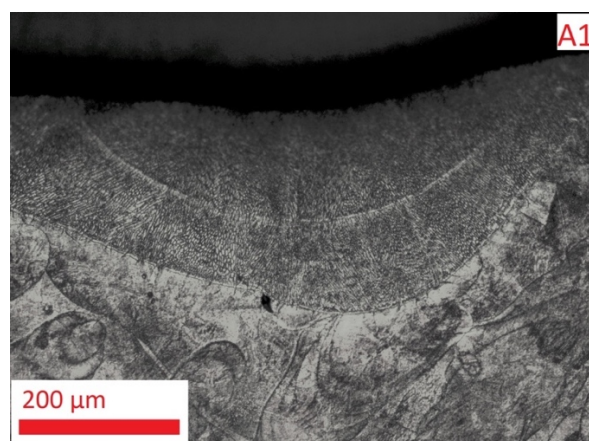
Tiriamasis taškas	Elementų kiekis %					
	O	Ti	Cr	Fe	Co	Ni
1	2.85	0.65	-1.79	63.09	9.91	25.28
2	2.96	0.59	-0.57	61.78	10.12	25.12
3	14.04	0.80	19.07	32.16	10.67	23.26
4	14.87	0.90	22.39	33.63	9.85	18.35
5	20.31	1.15	27.77	42.24	7.38	1.15
6	19.69	0.57	29.71	41.66	7.21	1.16
7	20.52	2.56	22.67	45.80	6.59	1.85
8	19.47	3.02	24.76	44.13	6.69	1.94

3.6 Sukeptintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų bandinių mikrostruktūros analizė.

A1 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.20 pav. (lazerio eigos greitis 500 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas be priedų, takelio įvirinimo plotis 837.74 μm , įvirinimo gylis 276.73 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose matomi smulkūs įtrūkimai iki 10 μm , pagrindiniame metalo ties sulydymo riba.



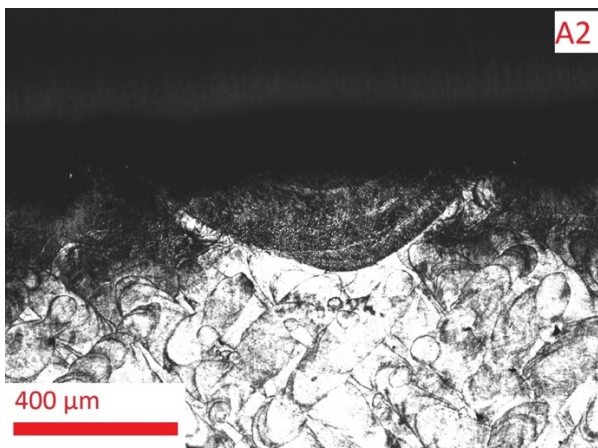
a



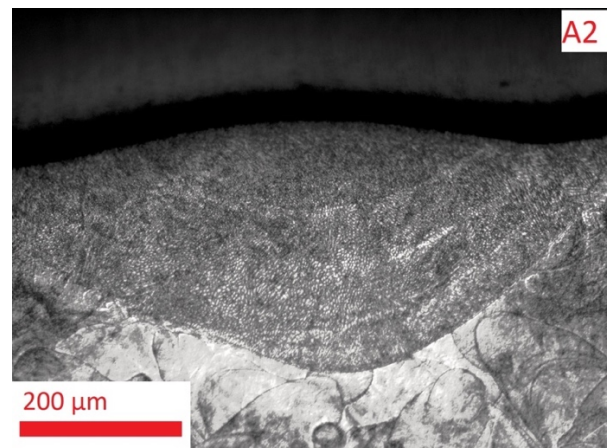
b

3.20 pav. A1 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

A2 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.21 pav. (lazerio eigos greitis 750 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas be priedų, takelio įvirinimo plotis 830.19 μm , įvirinimo gylis 266.67 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose matome, gražią sulydymo liniją be įtrūkimų.



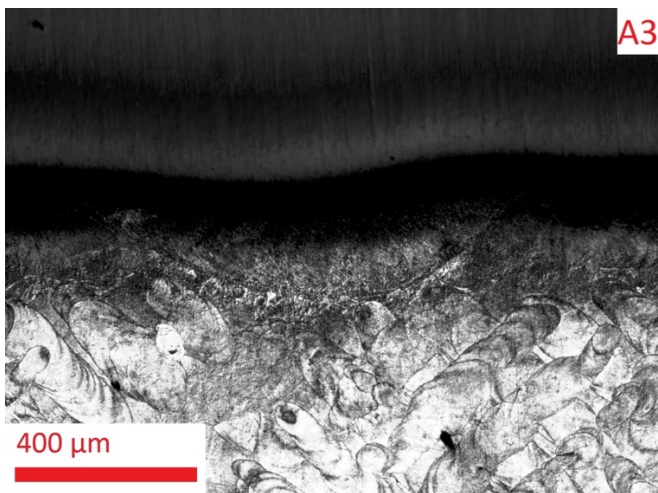
a



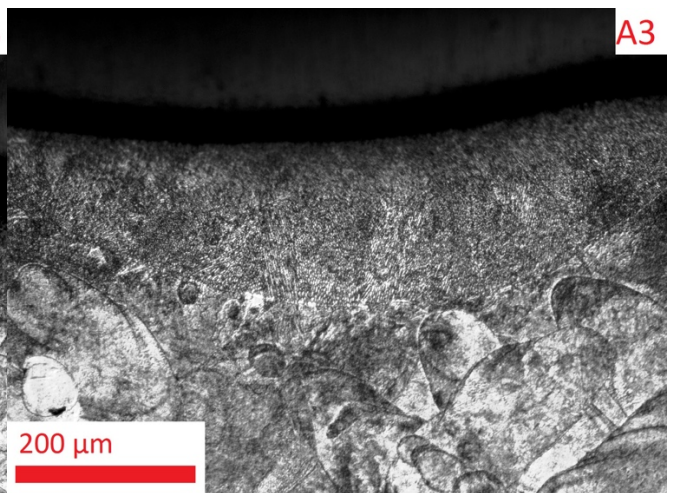
b

3.21 pav. A2 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

A3 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.22 pav. (lazerio eigos greitis 1000 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm. apdorojimo pobūdis lydymas be priedų, takelio įvirinimo plotis 817.61 μm , įvirinimo gylis 166.04 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose matome, gražią sulydymo liniją be įtrūkimų.



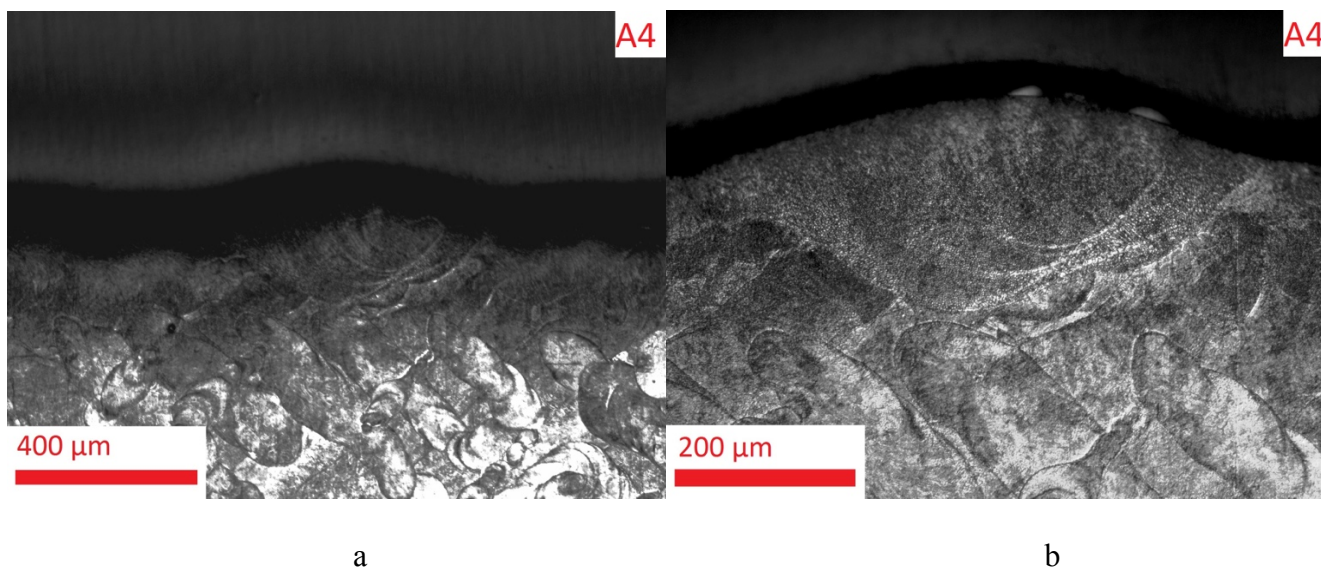
a



b

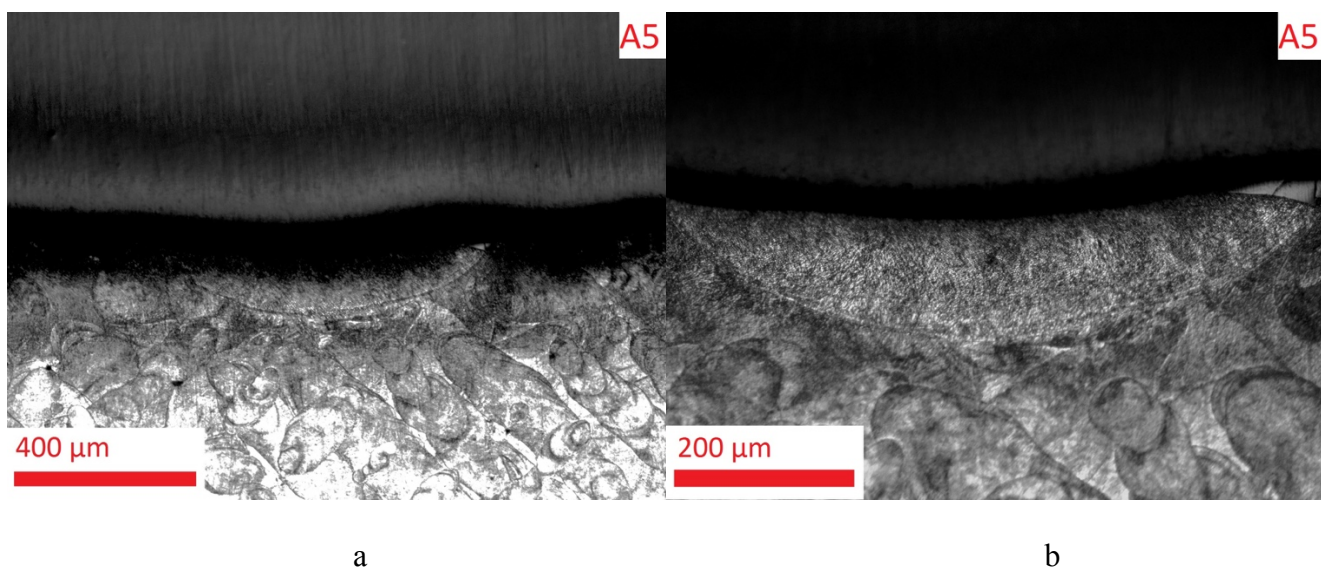
3.22 pav. A3 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

A4 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.23 pav. (lazerio eigos greitis 1250 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas be priedų, takelio įvirinimo plotis 480,50 μm , įvirinimo gylis 153.46 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose matome, gražią sulydymo liniją be įtrūkimų.



3.23 pav. A4 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

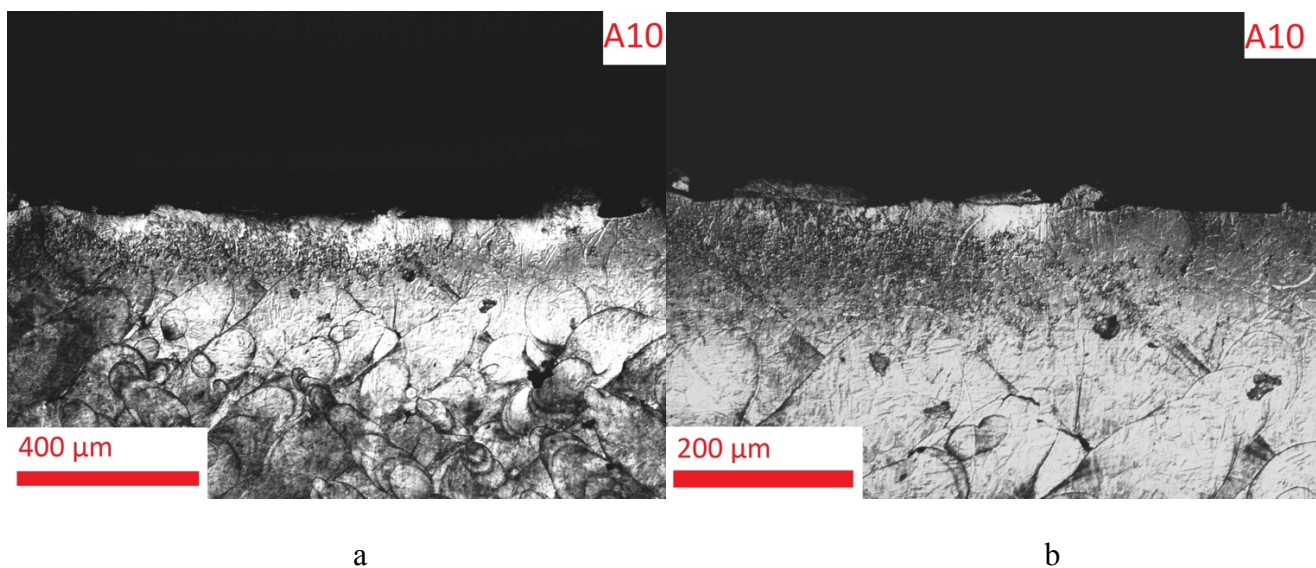
A5 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.24 pav. (lazerio eigos greitis 1500 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas be priedų, takelio įvirinimo plotis 669.18 μm , įvirinimo gylis 98.11 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose matome, gražią sulydymo liniją be įtrūkimų.



3.24 pav. A5 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

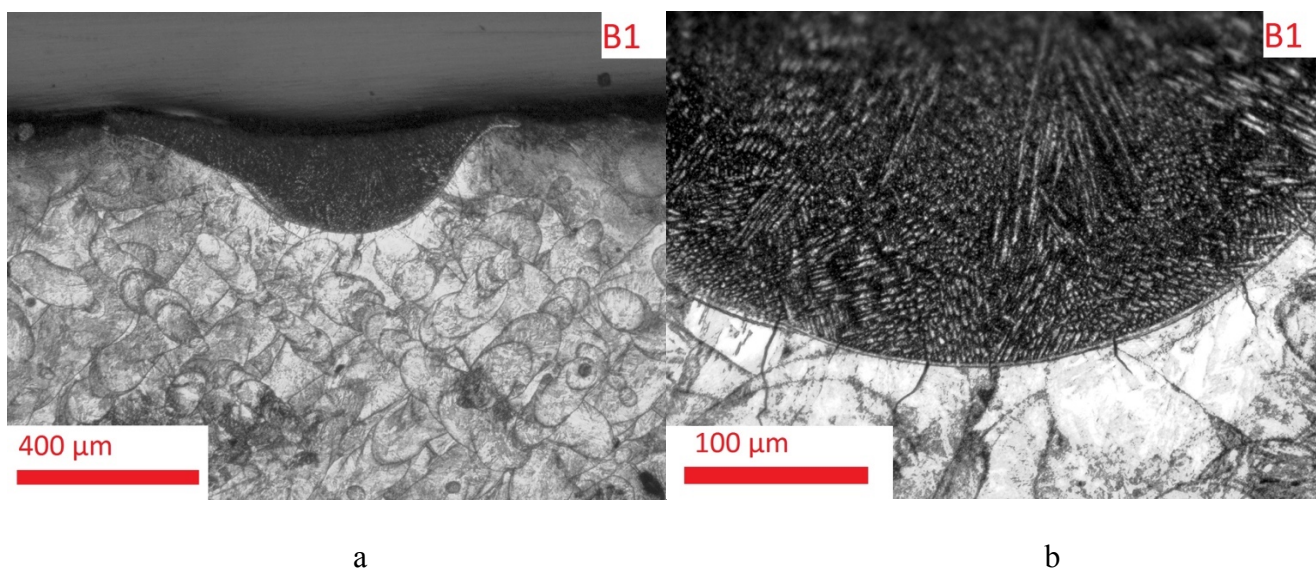
A10 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.25 pav. (lazerio eigos greitis 250 mm/min, lazerio dėmės dydis 3 mm., apdorojimo pobūdis lydymas be priedų). Nuotraukose atitinkamai takelio

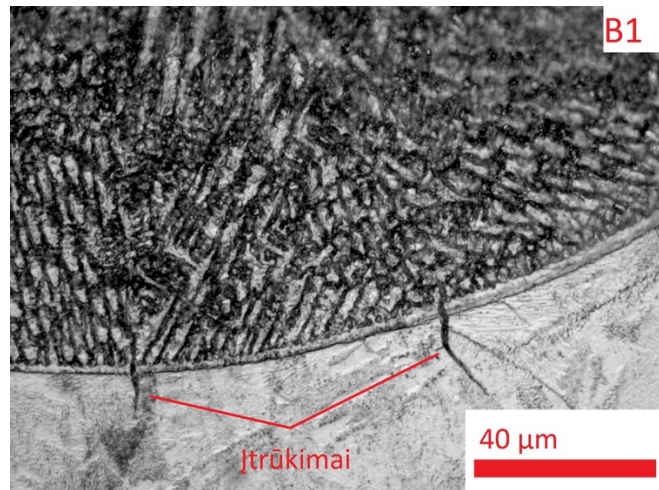
didinimas: a - 5x, b - 10x. Nuotraukose nepastebėjome perlydimo zonos, tik nežymią terminio poveikio zoną.



3.25 pav. A10 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 10 kartų

B1 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.26 pav. (lazerio eigos greitis 500 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas su pridėtiniu amorfiniu boru, takelio įvirinimo plotis 860,38 μm, įvirinimo gylis 221.38 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 10x, c - 20x. Nuotraukose matomi dideli įtrūkimai iki 100 μm, pagrindiniame metalė ties sulydymo riba.

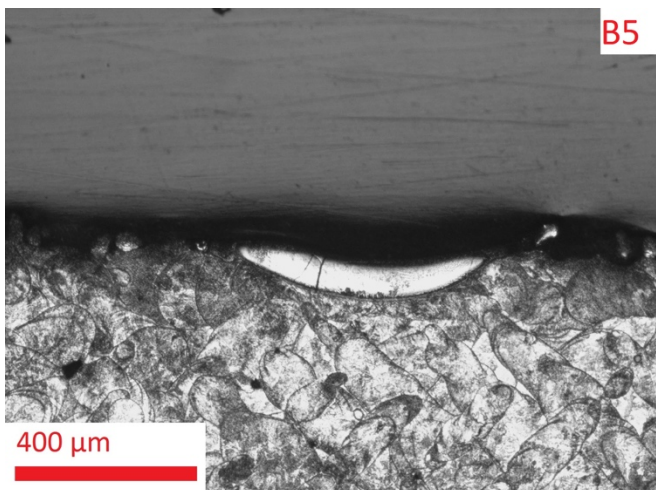




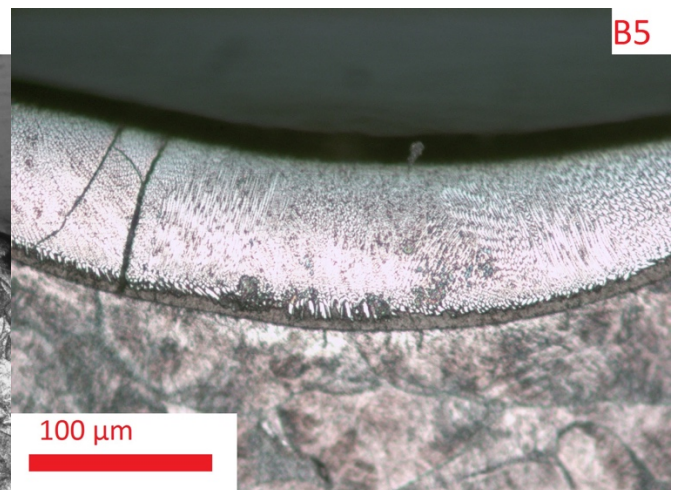
c

3.26 pav. B1 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 20 kartų, (c) - padidinta 50 kartų

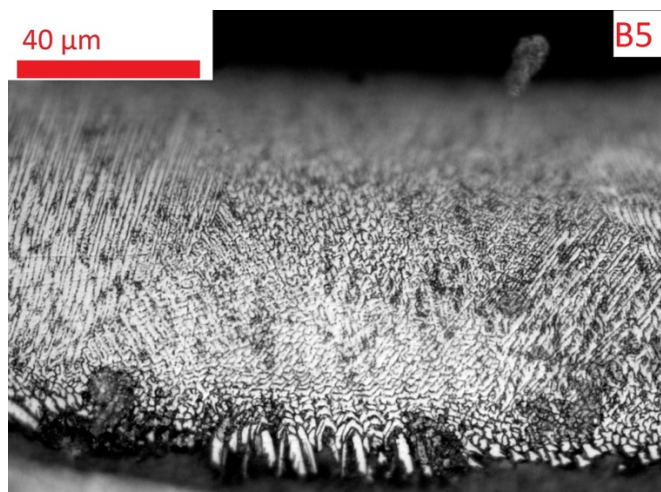
B5 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.27 pav. (lazerio eigos greitis 1500 mm/min, lazerio dėmės dydis 0.5 mm., apdorojimo pobūdis lydymas su pridėtiniu amorfiniu boru, takelio įvirinimo plotis 555.97 μm , įvirinimo gylis 98.11 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 20x, c - 50x. Nuotraukose matomą įtrūkimai per visą sulydymo zoną.



a



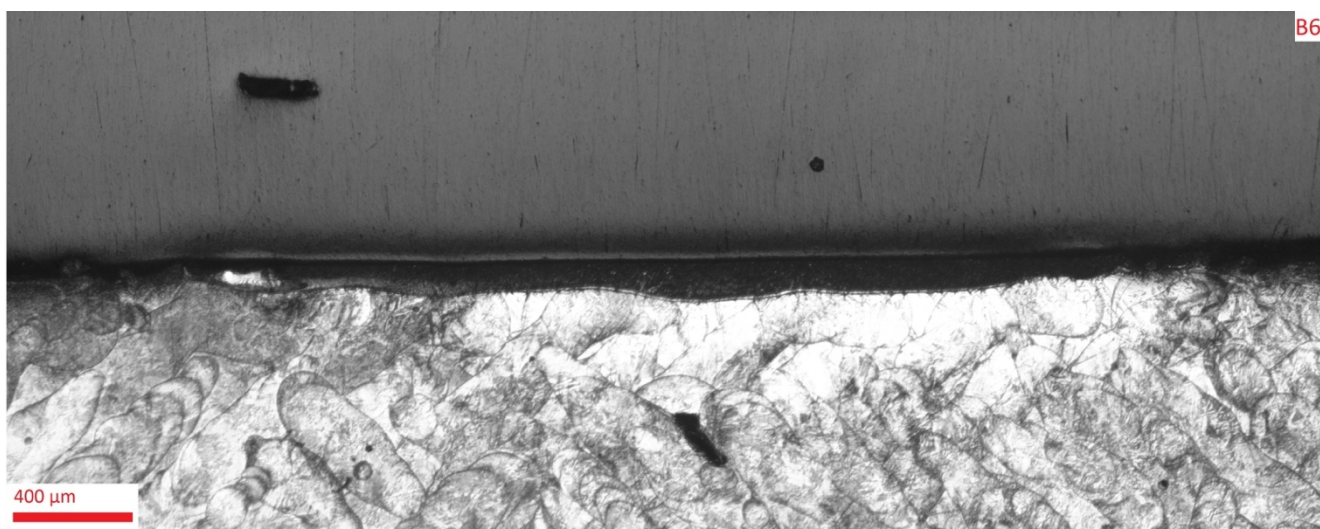
b



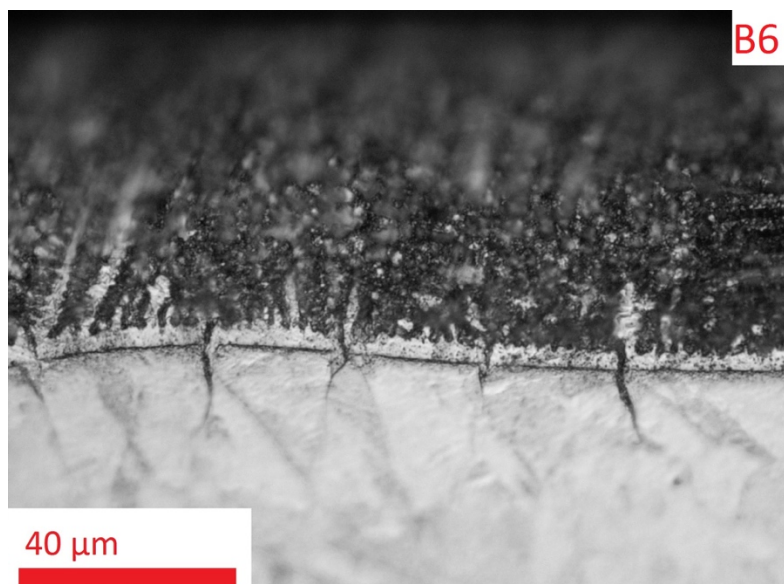
c

3.27 pav. B5 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 20 kartų, (c) - padidinta 50 kartų

B6 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.28 pav. (lazerio eigos greitis 500 mm/min, lazerio dėmės dydis 2 mm., apdorojimo pobūdis lydymas su pridėtiniu amorfiniu boru, takelio įvirinimo plotis 2040.25 μm , įvirinimo gylis 80.50 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 50x,. Nuotraukose matomi maži įtrūkimai iki 20 μm , pagrindiniame metale ties sulydymo riba.



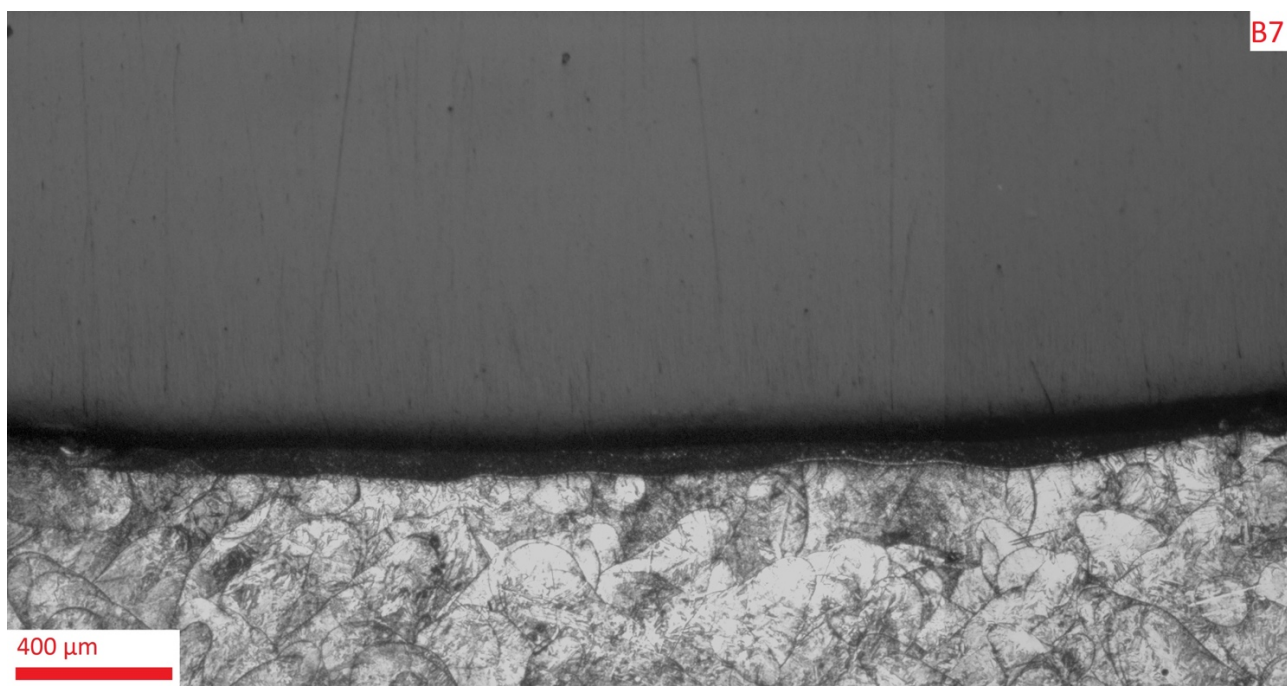
a



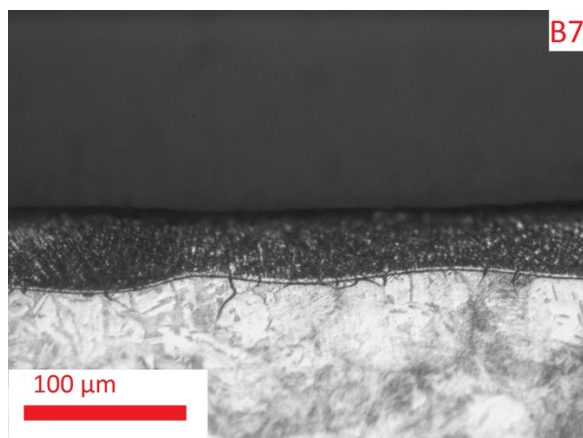
b

3.28 pav. B6 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 50 kartų

B7 bandinio siūlės mikrostruktūra pateikta 3.29 (lazerio eigos greitis 750 mm/min, lazerio dėmės dydis 2 mm., apdorojimo pobūdis lydymas su pridėtiniu amorfiniu boru, takelio įvirinimo plotis 1911,95 μm , įvirinimo gylis 45,28 μm). Nuotraukose atitinkamai takelio didinimas: a - 5x, b - 20x. Nuotraukose matomi vidutiniai įtrūkimai iki 50 μm , pagrindiniame metale ties sulydymo riba.



a



b

3.29 pav. B7 bandinio mikrostruktūros nuotraukos. (a) - padidinta 5 kartus, (b) - padidinta 20 kartų

IŠVADOS

1. Atliekant SLS sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių perlydyto metalo be priedų ir su amorfiniu boru sluoksnių geometrinius mikrotyrimus nustatyta, kad didinanat lazerinio apdorojimo greitį takelio plotis mažėja. Ryškesnis mažėjimas yra pastebimas kai apdorojimo greitis yra didinamas nuo 1250 iki 1500 mm/min.
2. Atlikus bandinių mikrokietumo tyrimą buvo nustatyta, kad abiem atvejais (perlydymas be boro ir perlydymas su boru, kai lazerio dėmės plotis 0.5 mm) didinant lazerinio apdorojimo greitį nuo 500 iki 1500 mm/min vidutinis metalo mikrokietumas iš pradžių mažėja ir mažiausia reikšmę pasiekia prie 1000 mm/min, o po to vėl didėja.
3. Atliekant sukepintų bandinių perlydytų sluoksnių mikrokietumo tyrimą pastebėta, kad atliekant perlydymą be priedų perlydyto sluoksnio mikrokietumas nežymiai sumažėjo (palyginus su pagrindiniu metalu). Perlydant sukepintus bandinius su amorfiniu boru apdoroto metalo mikrokietumas ženkliai padidėjo nuo 2 iki 5 kartų lyginant su pagrindiniu metalu ir iki 4 kartų lyginant su perlydytu sluoksniu be priedų.
4. Skaitinio modeliavimo tyrimo rezultatai parodė, kad reikalingas lazerio impulso poveikio laikas yra 20 ms. Esant šiam lazerio poveikio laikui yra užtikrinamas amorfinio boro 1 mm storio sluoksnio visiškas perlydymas. Atliekant perlydymą be priedų 20 ms lazerio impulso poveikio laikas leidžia pasiekti teorinį bandinio paviršinio sluoksnio perlydymą iki 1,5 mm.
5. Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimo metu buvo nustatyta, kad perlydyto su amorfiniu boru sluoksnio metalo cheminė sudėtis pasižymi dideliais deguonies ir chromo kiekiais iki 21 % ir 30 % atitinkamai. Tai galima paaiškinti, kad sukepintų bandinių lazerinio apdorojimo metu bandinio paviršiuje galimai formuojasi chromo oksidai ir boridai.

LITERATŪRA

- Balachninitė, O.; Bargelis, A.; Dementjev, A.; Jonušas, R.; Račiukaitis, G.; Sirutkaitis, V. 2008. *Lazerinė technologija*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.
- Bhaduri, D.; Penchev, P.; Dimov, S.; Soo, S. 2016. An investigation of accuracy, repeatability of laser micromachining systems, *Measurements* 88: 248–261.
- Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G. 2016. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83: 389–405.
- Chavoshi, S.; Goel, S.; Morantz, P. 2017. Current trends and future of sequential micro machining processes on a single machine tool, *Materials and design* 127: 37–53.
- Demir, A.; Pangovski, K.; O'Neill, W.; Previtali, B. 2014. Laser micromachining of TiN coatings with variables pulse durations and shapes in ns regime, *Surface and coatings technology* 258: 240–248.
- Farahmand, P.; Kovacevic, R. 2014. An experimental – numerical investigation of heat distribution and stress field in single – and multi – track laser cladding by high – power direct diode laser, *Optics & Laser Technology* 63: 154–158.
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. 2015. *Additive manufacturing technologies*. New York: Springer. 498 p.
- Gillner, A.; Holtkamp, J.; Hartmann, C.; Olowinsky, A.; Gedicke, J.; Klages, K.; Bosse, L.; Bayer, A. 2005. Laser applications in microtechnology, *Journal of materials processing technology* 163 (2): 494–498.
- Gu, D.; Shen, Y. 2009. Effects of processing parameters on consolidation and microstructure of W – Cu components by DLMS, *Journal of alloys and compounds* 10 (4): 107–115.
- Jankus S. M. 2018. *SLS atspausdintų detalių mikrostruktūros tyrimai*. Vilnius: Magistrantūros studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas. 51 p.
- Jiang, W.; Nair, R.; Molian, P. 2005. Functionally graded mold inserts by laser – based flexible fabrication: processing modeling, structural analysis, and performance evaluation, *Journal of materials processing and technology* 166 (2): 286–293.
- King, W. E.; Anderson, A. T.; Ferencz, M.; Hodge, N. E.; Kamath, C.; Khairallah, S. A.; Rubenchik, A. M. 2015. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges, *Applied Physics Reviews* 2.

- Kumar, S. 2009. Manufacturing of WC – Co moulds using SLS machine, *Journal of materials processing technology* 209 (8): 3840–3848.
- Kumar, A.; Yadava, V. 2007. International journal of machine tools and manufacture, *Laser beam machining* 45 (6): 609–628.
- Long, L.; Liu, Q.; Zhong, Z.; Xiong, L.; Shi, T. 2015. Experimental study on the process of laser – enhanced electrochemical micromachining stainless steel, *Optik – international journal for light and electron* 126 (19): 1862–1829.
- Manzirov, A. 2017. Advances in the theory of surface growth with applications to additive manufacturing technologies, *Procedia Engineering* 173: 11–16.
- Markovič, V.; Černašėjus, O.; Prokopovič, V. 2013. Lazerinės miltelių sukepinimo technologijos analizė, *Mechanics, material science, industrial engineering and management* 5(6): 676-679.
- Merklein, M.; Junker, D.; Shaub, A.; Neubauer, F. 2016. Hybrid additive manufacturing technologies – an analysis regarding potentials and applications, *Physics procedia* 83: 549–559.
- Mishra, S.; Yadava, V. 2015. Laser beam micromachining (LBMM), *Optics and lasers in Engineering* 73: 89–122.
- Murthy, M.; Varghese, I.; Cetinkaya, I. 2011. Laser cleaning for removal of nano / micro – scale particles and film contamination, *Developments in surface contamination and cleaning*: 63–122.
- Olakanmi, E.; Cochrane, R.; Dolgarno, K. 2015. A review on selective laser sintering / melting (SLS / SLM) of aluminium alloy powders, *Processing, microstructure, and properties, Progress in Materials Science* 74: 401–477.
- Paul, R.; Anand, S. 2012. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, *Journal of manufacturing systems* 34 (4): 429–437.
- Romano, J.; Ladani, L.; Sadowski, M. 2015. Thermal modeling of laser based additive manufacturing processes within common materials, *Procedia manufacturing* 1: 238– 250.
- Sovizi, M.; Massudi, R. 2005. Thermal distribution calculation in diode pumped Nd: YAG laser rod by boundary element method, *Optics and laser technology* 39: 46–52.
- Ulkar, E.; Lamikiz, A.; Lopez de Lacalle D.; Del Pozo, J. A. 2010. Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high – power diode laser, *International journal of machine tools and manufacture* 50 (1): 115–125.

- Ulkar, E.; Lamikiz, A.; Lopez de Lacalle, L.; Martinez, S.; Liebana, F. 2010. Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing, *Physics procedia* 5 (B): 395–403.
- Vaitkūnaitė, G.; Markovič, V.; Černašėjus, O. 2014. Selektvyvuoju lazerinio su kepinimo būdu su kepintų geležies pagrindo miltelių paviršiaus lazerinio mikroapdirbimo tyrimai, *Mechanics, Material science, Industrial Engineering and Management* 6: 661-665.
- Valiulis, A. V. 2005. *Naujos medžiagos*. Vilnius: Technika. 280 p.
- Valiulis, A. V. 2008. *Welding and thermal cutting*. Vilnius: Technika. 292 p.
- Zaeh, M.; Ott, M. 2011. Investigations on heat regulations of additive manufacturing processes for metal structures, *CIRP annals – manufacturing technology* 60 (1): 259–262.
- Zhang, K.; Liu, W.; Shang, X. 2007. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping, *Optics & laser technology* 39 (3): 549–557.
- Zhu, H.; Lu, J.; Ni, X.; Shen, Z.; Zhang, H. 2016. Measurement of thermal energy couplingm to metallic meterials in milisecond laser based on optical diffraction, *Optics and laser technology* 90: 84–89.
- Zhu, Y.; Zou, J.; Chen, X.; Yang, H. 2016. Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316L under lubricated conditions, *Wear* 23: 46–55.