



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Karolis Žlioba

**1.2709 MARTENSITINIO SENDINAMO PLIENO PAVIRŠIAUS
LAZERINIS LEGIRAVIMAS**

LASER ALLOYING OF MARAGING STEEL 1.2709 SURFACE

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Karolis Žlioba

**1.2709 MARTENSITINIO SENDINAMO PLIENO PAVIRŠIAUS
LAZERINIS LEGIRAVIMAS**

LASER ALLOYING OF MARAGING STEEL 1.2709 SURFACE

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Jelena Škamat

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Universitetinės antrosios pakopos (magistrantūros) studijų kryptis

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Medžiagų ir suvinirimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

(Parašas)

.....specializacija

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui Karolis Žlioba.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: 1.2709 Martensitinio sendinamo plieno lazerinis paviršiaus legiravimas
/ Laser alloying of maraging steel 1.2709 surface.....
patvirtinta 20...m. d. dekanų potvarkiu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2022 m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Atlikti literatūros analizę temomis: martensitiniai sendinami plienai ir jų paviršiaus stiprinimo būdai; metalų lazerinis paviršinis apdorojimas; lazerinio apdorojimo parametrų skaičiavimas/nustatymas. 2. Nustatyti/apskaičiuoti lazerinio apdorojimo parametrus ir parengti lazerinio apdorojimo metodiką. 3. Atlikti plieninio paviršiaus lazerinio apdorojimo eksperimentus. 4. Atlikti lazerių apdorotų paviršių mikrostruktūros ir savybių tyrimą. 5. Išanalizuoti, susisteminti ir apibendrinti tyrimų rezultatus bei parengti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas

.....
(Parašas)

.....doc. dr. Jelena Škamat.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
.....Karolis Žlioba.....
(Vardas, pavardė)
.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra		ISBN _____ ISSN _____ Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4		
Pavadinimas	1.2709 martensitinio sendinamo plieno lazerinis paviršiaus legiravimas	
Autorius	Karolis Žlioba	
Vadovas	Jelena Škamat	
Kalba: lietuvių		
Anotacija Baigiamajame magistro darbe atliekamas 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno bandinių, pagamintų taikant selektyvinio lazerinio sulydymo (SLM) technologiją, paskesnio lazerinio paviršių modifikavimo legiruojant tyrimas, siekiant pagerinti paviršių kietumą. Nagrinėjamas įvairių legiruojamųjų priedų ir skirtingų lazerinio legiravimo proceso parametrų poveikis bandinių paviršių mikrostruktūrai, fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Darbe atlikti bandomieji eksperimentiniai tyrimai siekiant nustatyti naudingiausius lazerinio paviršiaus modifikavimo parametrus, procesą atliekant nuolatinės veikos CO₂ lazeriu. Atlikti eksperimentiniai tyrimai, 1.2709 markės plieno SLM bandinio paviršius legiruojant B₄C, Co₃B, TiC ir TaSi₂ legiruojamaisiais priedais, naudojant 4 skirtingus lazerinio paviršiaus legiravimo režimus. Tyrimo metu atlikti optinės mikroskopijos tyrimai, mikrokietumo matavimai, nustatomi ir įvertinami lazeriu legiruotų paviršinių sluoksnių geometriniai parametrai, fizikinių ir mechaninių savybių pokyčiai, susiformavusių sluoksnių mikrostruktūra. Pagal gautus rezultatus parengtos išvados ir rekomendacijos. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros šaltinių analizė, eksperimentinių tyrimų metodika, tyrimų analizės metodika, rezultatai, išvados ir rekomendacijos, literatūros šaltinių sąrašas. Magistro darbo apimtis – 100 psl., 43 pav., 28 lentelės, 45 bibliografiniai šaltiniai.		
Prasminiai žodžiai: martensitiniai sendinami plienai, 1.2709 plienas, SLM, lazerinis paviršiaus legiravimas, lazerinis modifikavimas, B ₄ C, Co ₃ B, TiC, TaSi ₂ legiruojamieji priedai, kietumo didinimas.		

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechanical and Material Engineering	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Materials and Welding Engineering study programme Master Graduation Thesis 4 Title Laser Alloying of Maraging Steel 1.2709 Surface Author Karolis Žlioba Academic supervisor Jelena Škamat	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation In this final Master's thesis, an investigation is carried out about 1.2709 maraging steel specimens, manufactured by selective laser melting (SLM) technology, subsequent laser surface modification by alloying to improve mechanical properties of the surface layers. The effect of different alloying additives and different laser alloying process parameters on mechanical and physical properties of sample surfaces are being analyzed. During research pilot experimental tests have been carried out and to determine the most useful parameters for laser surface modification using continuous wave CO₂ laser. After that, experimental investigations have been carried out by alloying 1.2709 maraging steel SLM sample surfaces with B₄C, Co₃B, TiC & TaSi₂ alloying additives using 4 different laser surface alloying modes. Afterwards, analysis with optical microscopy, microhardness tests were performed. During these tests, geometrical parameters, changes in physical, mechanical properties and microstructure of the newly formed layers were observed and evaluated. Conclusions and recommendations were drawn from the tests results. The thesis consists of 7 parts: introduction, analysis of literature sources, methodology of experimental research, methodology of research analysis, results, conclusions and recommendations, list of literature sources. The scope of the Master's thesis is 100 pages, 43 fig., 28 tables, 45 bibliographic sources.	
Keywords: maraging steels, 1.2709 steel, SLM, laser surface alloying, laser modification, B₄C, Co₃B, TiC, TaSi₂ additives, hardness increase.	

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
ŽYMENYS	11
SANTRUMPOS.....	11
ĮVADAS.....	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA	15
1.1. Adityvioji gamyba.....	15
1.1.1. SLS technologija.....	15
1.1.2. SLM technologija.....	16
1.2. Martensitiniai sendinami plienai	18
1.2.1. Martensitinis sendinamas plienas 1.2709	19
1.3. Klasikiniai martensitinio sendinamo plieno paviršiaus kietinimo būdai	21
1.3.1. Azotinimas (Nitravimas).....	21
1.3.2. Cementavimas (Įanglinimas)	24
1.3.3. Nitrocementavimas ir cianavimas.....	26
1.3.4. Borinimas.....	29
1.3.5. PVD dangų technologija	31
1.4. Lazerinis paviršiaus apdirbimas (modifikavimas)	35
1.4.1. Lazerinio paviršiaus apdirbimo (modifikavimo) metodų klasifikavimas	35
1.4.2. Lazerinis paviršiaus legiravimas.....	37
1.4.3. Legiravimo priedai.....	39
1.4.4. Parinkti SLM gaminio paviršiaus modifikavimo procesui naudojami legiruojamieji priedai	40
2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA	42
2.1. Tiriamojo objekto (SLM bandinių) gamyba	42
2.2. Impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumo tyrimas skaitiniu modeliavimu baigtinių elementų metodu.....	43
2.2.1. Sukurto tiriamojo modelio verifikavimui atlikti naudotos plokštelės medžiaga, matmenys ir parametrai	43
2.2.2. Eksperimentui atlikti naudota lazerinė įranga.....	44

2.2.3.	Lazerinio paviršiaus modifikavimo parametrai	45
2.2.4.	Eksperimentinių tyrimų metų gautų duomenų apdorojimas	46
2.2.5.	Šilumos mainų skaičiavimo baigtinių elementų metodika	47
2.2.6.	Skaitinis modeliavimas	50
2.2.7.	Skaitinio modeliavimo BE metodu rezultatai	51
2.2.8.	Skaitinio modeliavimo BE metodu taikant impulsinio nanosekundinio lazerio apdorojamą martensitinio sendinamo plieno modelio paviršiui tyrimas	52
2.2.9.	Impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumo įvertinimo apibendrinimas	55
2.3.	Bandomasis lazerinis SLM bandinių paviršių apdorojimas nuolatinės veikos CO ₂ lazeriu siekiant parinkti tinkamiausių lazerinio paviršiaus legiravimo parametrų diapazoną	55
2.3.1.	Lazerinio paviršiaus modifikavimo be legiruojamųjų priedų režimai	55
2.3.2.	Lazeriu modifikuotų takelių be legiruojamųjų priedų tyrimas	56
2.3.3.	Bandomųjų eksperimentinių tyrimų rezultatai ir apibendrinimas	57
2.4.	LSA proceso skaitinis modeliavimas BE metodu	58
2.4.1.	LSA proceso skaitinio modeliavimo BE metodu metodika	58
2.4.2.	LSA proceso skaitinio modeliavimo tyrimo rezultatai	60
2.4.3.	LSA proceso skaitinio modeliavimo BE metodu rezultatų apibendrinimas.....	66
2.5.	SLM technologija pagamintų bandinių paskesnio lazerinio legiravimo režimai	66
2.6.	Lazeriu apdorotų paviršių tyrimo metodika	68
2.6.1.	Optinė mikroskopija.....	68
2.6.2.	Mikrokietumo matavimai.....	69
2.6.3.	Tamprumo modulio nustatymas	70
2.6.4.	Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos tyrimas	73
3.	TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI.....	74
3.1.	Makroskopinės analizės tyrimo rezultatai.....	74
3.2.	Mikrokietumo tyrimo rezultatai	79
3.3.	Tamprumo modulio nustatymo rezultatai	85
3.4.	Lazeriu apdoroto SLM bandinio paviršių mikrostruktūros analizė	86
3.5.	Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	93
	IŠVADOS	94
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	96

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis pagal gamintojo specifikaciją, masės %	20
1.2 lentelė. Pagrindinės martensitinio sendinamo plieno 1.2709 mechaninės savybės	20
2.1 lentelė. Technologiniai SLM proceso parametrai.....	43
2.2 lentelė. 1.4301 markės plieno cheminė sudėtis	44
2.3 lentelė. 1.4301 markės plieno ekvivalentai įvairiuose standartuose.....	44
2.4 lentelė. Pagrindinės 1.4301 markės plieno mechaninės savybės.....	44
2.5 lentelė. Pagrindinės 1.4301 markės plieno fizikinės savybės.....	44
2.6 lentelė. Lazerio EKSPLA „Baltic HP 1064“ specifikacija	45
2.7 lentelė. Lazerinio plokštelės paviršiaus modifikavimo technologijos režimo parametrai.....	45
2.8 lentelė. Lazeriu suformuotų taškų skersmens matavimai	46
2.9 lentelė. Lazeriu suformuotų taškų matavimai skersinio pjūvio nuotraukoje	47
2.10 lentelė. Lazeriu išgarintos zonos geometrinių parametrų matavimų rezultatai gauti skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų metu.....	52
2.11 lentelė. Fizikinės ir mechaninės martensitinio sendinamo plieno 1.2709 (DIN) savybės, naudotos skaitiniam modeliavimui atlikti.	53
2.12 lentelė. Lazerinio plokštelės paviršiaus modifikavimo technologijos režimo parametrai, kai medžiaga nėra išgarinama.....	53
2.14 lentelė. Lazerinio paviršiaus modifikavimo be legiruojamųjų priedų režimų techniniai parametrai .	56
2.15 lentelė. Bandomųjų eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	57
2.17 lentelė. LSA proceso skaitiniu modeliavimu BE metodu nustatyti geometriniai lazeriu apdoroto takelio parametrai.....	66
2.18 lentelė. Legiruojamųjų priedų paskirstymas.....	67
2.19 lentelė. SLM bandinio paskesnio LSA CO ₂ lazeriu režimai	67
2.20 lentelė. Knopo mikrokietumo bandymo parametrai	69
3.1 lentelė. Martensitinio sendinamo plieno bandinio paviršiuje LSA procesu suformuotų takelių skersinių pjūvių nuotraukos	75
3.2 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su B ₄ C priedu skerspjūvių nuotraukos	88
3.3 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su Co ₃ B priedu skerspjūvių nuotraukos	89
3.4 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su TiC priedu skerspjūvių nuotraukos	90
3.5 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su TaSi ₂ priedu skerspjūvių nuotraukos.	92
3.6 lentelė. Teorinių ir eksperimentinių geometrinių matmenų palyginimas	93

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Principinė SLM technologijos schema. (Bremen, Meiners ir Diatlov, 2012)	17
1.2 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 bandinio paviršiaus kietumo pasiskirstymas ir mikrostruktūra. Viršutinėje kreivėje po azotinimo proceso, apatinėje – nitrocementavimo (Cajner et al., 2009)	23
1.3 pav. Kietumo pasiskirstymas įanglčiuose martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 bandiniuose (Cajner et al., 2009)	25

1.4 pav. Nitrocementuoto martensitinio sendinamo plieno bandinio skerspjūvio mikrokietumo pasiskirstymas (Wu ir Yan, 2011).....	28
1.5 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 mikrostruktūra ir kietumo pasiskirstymas po borinimo (Cajner et al., 2009)	30
1.6 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 mikrostruktūra ir kietumo pasiskirstymas po kombinuoto paviršiaus apdorojimo įzotinant plazmoje ir padengiant PVD TiN danga (Cajner et al., 2009)	34
1.7 pav. Lazerinio paviršiaus apdirbimo metodų grupavimo pagal energinius požymius diagrama (Balachinaitė et al., 2008)	36
1.8 pav. Lazerinių technologinių procesų grupavimo schema (Balachinaitė et al., 2008).....	37
1.9 pav. Legiravimo lazerio spinduliuote schema: a) legiravimo milteliai įpurškiami lydymo metu; b) naudojama pasta su legiruojamaisiais priedais (Kusinski et al., 2012):.....	38
2.1 pav. Concept Laser M3 selektyviojo lazerinio sulydymo įrenginys	42
2.2 pav. Nanosekundinis lazeris Ekspla „Baltic HP 1064“	45
2.3 pav. 1.4301 markės plieno plokštelės paviršius po lazerinio modifikavimo proceso	46
2.4 pav. 1.4301 markės plieno skersinio pjūvio nuotrauka po lazerinio modifikavimo proceso.....	47
2.5 pav. Plokštelės modelis, suskaidytas į baigtinius elementus.....	50
2.6 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo plokštelės paviršiuje grafikas. Vaizdas iš viršaus.....	51
2.7 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo plokštelės centro gylyje grafikas. Vaizdas plokštelės pjūvio per centrą.....	51
2.8 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo 1.2709 markės plieno modelio paviršiuje grafikas. Vaizdas iš viršaus	54
2.9 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo 1.2709 markės plieno modelio gylyje grafikas. Vaizdas modelio pjūvio per centrą	54
2.10 pav. SLM technologija sulydyto bandinio 3D modelis sudalytas į baigtinius elementus	59
2.11 pav. SLM technologija sulydyto bandinio 3D modelis su priskirtomis lazerinio paviršiaus modifikavimo sąlygomis.....	59
2.12 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 8,7 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 8,7 cm/min	60
2.13 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 1 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 1 taške (poveikio laikas 0,065 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas	61
2.14 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 2 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 2 taške (poveikio laikas 0,196 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas	62
2.15 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3 taške (poveikio laikas 0,327 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas	63
2.16 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 4 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 4 taške (poveikio laikas 0,458 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas	64

2.17 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 67 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 67 cm/min	65
2.18 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 91 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 91 cm/min	65
2.19 pav. Bandinių paviršių suskirstymas.....	66
2.20 pav. NICON ECLIPSE MA200 analitinis mikroskopas	68
2.21 pav. Universalus automatizuotas kietmatis „Zwick Roell ZHμ“	70
2.22 pav. Tamprioji ir plastinė deformacija matuojant kietumą Knopo metodu	71
2.23 pav. Knopo indentoriaus įspaudo eskizas	71
2.24 pav. SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi	73
3.1 pav. LSA procesu apdorotų paviršių takelių gylgio kitimo grafikas.....	77
3.2 pav. LSA procesu apdorotų paviršių takelių pločio kitimo grafikas.....	78
3.3 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto B_4C priedais, mikrokietumo kitimo grafikas.	80
3.4 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto Co_3B priedais, mikrokietumo kitimo grafikas	81
3.5 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto TiC priedais, mikrokietumo kitimo grafikas.	82
3.6 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto $TaSi_2$ priedais, mikrokietumo kitimo grafikas.....	83
3.7 pav. Vidutinių lazeriu apdorotų bandinių paviršių perlydimo zonoje nustatytų mikrokietumo reikšmių palyginimo diagrama, procentinė išraiška	84
3.8 pav. Vidutinių lazeriu apdorotų SLM bandinių tamprumo modulio (E) lazerio perlydymo zonoje reikšmių stulpelinė diagrama	85
3.9 pav. SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno 1.2709 mikrostruktūra	87
3.10 pav. Celinės struktūros formavimasis a) išilginiame pjūvyje; b) skersiniame pjūvyje (Karayagiz et al., 2020)	87

ŽYMENYS

HRC – kietis pagal Rockvelą.

HV – kietis pagal Vikersą.

HK – kietis pagal Knopą.

E – tamprumo (Jungo) modulis.

SANTRUMPOS

3D – trijų dimensijų;

AM – adityvioji gamyba (angl. *additive manufacturing*).

BE – baigtiniai elementai.

LAM – adityvioji gamyba lazeriu (angl. *laser additive manufacturing*).

LSM – lazerinis paviršiaus modifikavimas (angl. *laser surface modification*).

LSA – lazerinis paviršiaus legiravimas (angl. *laser surface alloying*).

LOV – lazerio operacijos tūris (angl. *laser operation volume*).

SEM – skenuojamoji elektroninė mikroskopija;

SLS – selektyvusis lazerinis sukepinimas;

SLM – selektyvusis (atrankinis) lazerinis sulydymas (angl. *selective laser melting*);

STL – struktūrizuotų šablonų kalba (angl. *structured template language*);

DMLS – tiesioginis metalo lazerinis sukepinimas (angl. *direct metal laser sintering*);

PVD – fizikinis garų nusodinimas (angl. *physical vapour deposition*).

IVADAS

Tiriamoji problema

Martensitinis sendinamas plienas – tai specialios klasės plienas, kuris pasižymi labai dideliu stiprumu, pvz., 1.2709 (DIN) / M300 instrumentinio plieno stiprumo riba gali būti nuo 1850 MPa iki 1950 MPa (po terminio apdirbimo), tačiau šis plienas kaip ir kiti martensitiniai sendinami plienai pasižymi nepakankamu kietumu po terminio apdirbimo, kad galėtų priešintis abrazyviniam dilimui. 1.2709 plieno kietumas po terminio apdirbimo yra 50-55 HRC.

Dėl gausaus legiruojamųjų elementų kiekio martensitiniai sendinami plienai yra brangūs ir greitas detalių ir gaminių nusidėvėjimas dėl sąlyginai nedidelio kietumo yra labai neekonomiškas, todėl nedidelis kietumas po terminio apdirbimo yra pagrindinė šio plieno panaudojimo problema.

Darbo aktualumas

Šiais laikais vis daugiau dėmesio yra skiriama adityviosios gamybos technologijoms. Taikant tokias technologijas galima pagaminti ir realizuoti labai sudėtingų geometrinių formų detales ar sprendimus su įvairialype vidine struktūra ir plačiu kokybinių charakteristikų spektru. Adityvioji gamybos technologija yra ekologiškesnė ir naudingesnė nei tradiciniai gamybos būdai, nes sunaudojama mažiau pasaulyje senkančių žaliavų (brangiųjų metalų).

Metalo miltelių sulydymas lazeriu yra labai perspektyvi adityviosios gamybos technologija, o martensitinių sendinamų plienų milteliai yra labai gerai šiuo procesu apdorojama medžiaga, kuri pasižymi puikiais stiprumo, plastiškumo, tūsumo savybėmis, tačiau pagamintos detalės taip pat pasižymi nepakankamomis paviršinio sluoksnio charakteristikomis, dažnai neatitinka techninių reikalavimų, dėl nepakankamo kietumo ir atsparumo dilimui greitai nusidėvi, nėra atsparios korozijai.

Dėl šių paviršinių sluoksnių trūkumų platesnis metalo gaminių realizavimas taikant SLM technologiją šiuo metu yra apribotas.

Pasaulyje atliekama daug mokslinių tyrimų siekiant pagerinti šia adityviosios gamybos technologija sukurtų gaminių technologines savybes.

Todėl tolesnis lazerinis paviršiaus modifikavimas, paviršius legiruojant lazeriu, gali būti labai aktualus, praktiškas ir perspektyvus būdas šioms problemoms ir trūkumams spręsti. Todėl

yra svarbu tirti įvairių legiruojamųjų priedų ir elementų poveikį lazeriu suldytų gaminių paviršiams.

Tyrimo objektas

Selektyvinio lazerinio sulydymo būdu pagamintų martensitinio sendinamo plieno 1.2709 (DIN) / M300 gaminių paviršiai.

Darbo tikslas

Nustatyti lazerinio paviršiaus legiravimo su įvairiais legiruojamaisiais elementais parametų poveikį martensitinio sendinamo plieno 1.2709 paviršiaus struktūrai ir savybėms, įvertinti tokio paviršiaus apdorojimo taikymo efektyvumą.

Darbo uždaviniai

- Išanalizuoti ir įsisavinti lazerinio paviršiaus modifikavimo proceso teoriją ir metodiką.
- Išanalizuoti legiruojamųjų elementų poveikį plienų paviršių savybėms, ir parinkti tinkamiausius legiruojamuosius elementus martensitinio sendinamo plieno paviršiaus savybėms sustiprinti.
- Sudaryti martensitinio sendinamo plieno paviršiaus lazerinio legiravimo metodiką.
- Atlikti eksperimentus pagal nustatytus technologinio proceso parametrus.
- Sudaryti lazeriu legiruotų paviršių tyrimų metodiką.
- Ištirti lazeriniu paviršiaus modifikavimu su legiruojamaisiais elementais apdirbtų paviršių geometrinius parametrus, sandarą ir kietumą.
- Susisteminti gautus tyrimo rezultatus, parengti išvadas ir įvertinti tokio plieno paviršiaus apdorojimo taikymo efektyvumą palyginant su kitais žinomais plieno paviršiaus apdorojimo būdais.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Šiuo metu, nėra daug literatūros šaltinių ir informacijos martensitinių sendinamų plienų lazerinio legiravimo tema. Šis darbas suteikia naujų mokslinių žinių apie tai, kaip pasikeičia martensitinio sendinamo plieno gaminių paviršiaus sandara ir jo kietumas, jį apdirbant lazerinio legiravimo procesu su įvairiais legiruojamaisiais priedais.

Atlikus eksperimentinius lazerinio legiravimo tyrimus su nuolatinės veikos CO₂ lazeriu ir taikant 500 W lazerio galią, 1,2 mm lazerio dėmės skersmenį ir lazerio skenavimo greitį nuo 8,7 iki 91 cm/min, gautos išlydytos vonelės geometrinių parametrų (gylgio ir pločio) priklausomybės nuo lazerio greičio keturiems legiravimo priedams (Co₃B, B₄C, TiC ir TaSi₂), kurios leidžia prognozuoti vonelės geometriją ir/arba parinkti lazerinio apdorojimo parametrus taikytame parametrų diapazone.

Taikant darbe apibrėžtus lazerinio legiravimo parametrus, pasiekti reikšmingi martensitinio sendinamo plieno paviršiaus sukietinimo efektai. Su TaSi₂ gautas didžiausias kietumas (~1140 HK), kuris yra ~2,7 karto didesnis už SLM bandinio medžiagos vidutinį mikrokietumą iki sendinimo (424 HK) ir ~1,9 karto didesnis už martensitinio sendinamo plieno kietumą po sendinimo (~600 HK) ir viršija kietumą po termocheminio įžotinimo, kuris šiuo metu taikomas pramonėje šiems tikslams.

Darbe pateikti mikrostruktūrinių tyrimų rezultatai, kurie leido apibrėžti tolimesnių tyrimų vystant šią technologiją gaires.

Darbo praktinė vertė

- Tobulėjant lazeriams ir vis labiau didėjant lazerinių technologijų pritaikymui ir panaudojimui gamyboje ir pramonėje, lazerinis paviršiaus legiravimas gali būti labai perspektyvi ir efektyvi alternatyva martensitinių sendinamų plienų klasikiniams paviršių sukietinimo būdams.
- Įmonės, kurios specializuojasi adityviojoje gamyboje, ir naudoja DMLS ar SLS(SLM) technologijas, galėtų ta pačia įranga sukietinti šių plienų paviršius, taip pat, specialistams, kurie dirba tokioje 3D (atidvyviojoje) gamyboje būtų nesudėtinga įgyti papildomos kvalifikacijos, reikalingos atlikti lazerinį paviršiaus legiravimo procesą.
- Pastaruoju metu dėl spartaus lazerių gamybos sektoriaus vystymosi, mažėja lazerio įrenginių kaina ir šie įrenginiai tampa vis labiau prieinami įvairių pramonės šakų atstovams, todėl pritaikant lazerinio legiravimo technologiją sukietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius įmonės galėtų tikslingiau ir naudingiau išnaudoti savo turimus resursus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai buvo pristatyti 25-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Adityvioji gamyba

Adityvioji gamyba (AM) – tai toks gamybos procesas, kai skaitmeniniu būdu valdant procesą detalės yra kuriamos sluoksnis po sluoksnio nusodinant medžiagą, tokia gamyba gali būti identifikuojama kaip 3D (gamyba 3D spausdintuvu) arba greitųjų prototipų kūrimu (Karayel ir Bozkurt, 2020).

Palyginti su įprastiniu gamybos procesu, adityviosios gamybos technologijos turi daug teigiamų aplinkosauginių privalumų. Svarbiausia, kad mažiau švaistoma žaliavų ir naudojamos naujos ir išmaniosios medžiagos (Javaid et al., 2021).

AM yra tokia technologija, kuri žada sumažinti detalių kainą, sumažinant medžiagų švaistymą ir laiką iki pateikimo rinkai. Taip pat, AM gali išplėsti dizaino ir kompleksiško galimybes, tai gali leisti sutaupyti detalės svorio ir palengvinti sudėtingų detalių gamybą. Pradžioje ši technologija buvo naudojama polimerinėms medžiagoms, tačiau paskutiniu metu padarė didelę pažangą taikant metalines medžiagas. Ja galima apdirbti platų spektrą metalų, jų lydinių, keramikų (Karayel ir Bozkurt, 2020).

AM arba 3D spausdinimas iš metalų leidžia gaminti formas, kurių anksčiau pagaminti buvo neįmanoma arba jas realizuoti buvo galima tik taikant labai ilgai trunkančius įrankiais paremtus paruošiamuosius gamybos metodus (Hällgren, Pejryd ir Ekengren, 2016).

AM technologijoje taikomi skirtingi gamybos metodai, kuriuos galima klasifikuoti pagal taikymo sferą ir kokioms medžiagoms apdoroti jie naudojami. Vieni iš dažniausiai taikomų metodų yra selektyvusis sukepinimas lazeriu (SLS), selektyvusis sulydymas lazeriu (SLM), stereolitografija (SLA), medžiagos purškimas (angl. *material jetting*), rišiklio purškimas (angl. *binder jetting*) medžiagos ekstruzija ir kt (Karayel ir Bozkurt, 2020).

1.1.1. SLS technologija

Selektyvusis sukepinimas lazeriu (SLS) yra miltelių sluoksnio sintezės technologija, kurioje lazerio energija naudojama selektyviajam miltelių dalelių kaitinimui, proceso metu dalelių paviršiai yra iš dalies aplydomi ir įvyksta greta esančių dalelių susijungimas ir sukietėjimas. Šitaip siekiama sukurti 3D objektą pagal kompiuterizuotą dizainą (CAD) (Lekurwale, Karanwad ir Banerjee, 2022).

SLS procesas yra adityviosios gamybos technologija, kurią sukūrė ir užpatentavo Deckard C. ir kiti mokslininkai 1988 metais (Kenzari et al., 2012).

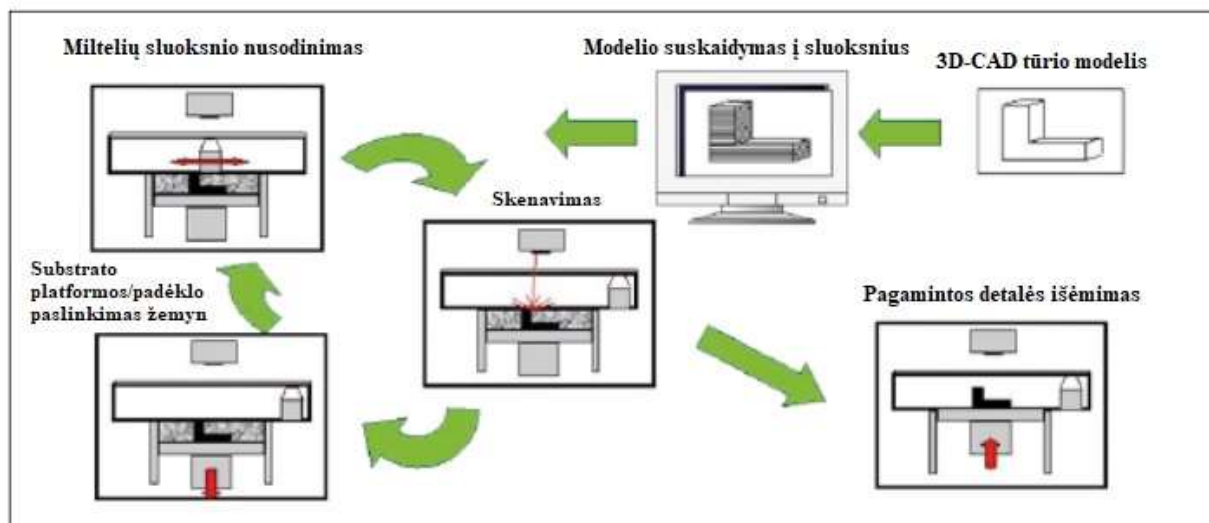
Fizinis objektas yra gaminamas sluoksnis po sluoksnio, priešingai nei tradicinės (subtraktyviosios) gamybos technologijos metu. SLS naudojamas lazerio spindulys, kuris selektyviai sulydo miltelių pavidalo medžiagas, skenuodamas skerspjūvius sukurtus pagal STL formato failą. Pirmiausia ritininiu mechanizmu į darbinę kamerą yra paskleidžiamas labai plonas šiluminiu srautu sulydomų miltelių sluoksnis, kuris yra įkaitinamas keliais laipsniais žemiau lydymosi temperatūros. Po to, lazerio spinduliu selektyviai brėžiamas gaminamos detalės skersinis pjūvis. Lazerio spinduliui sąveikaujant su milteliais, milteliai yra įkaitinami iki lydymosi temperatūros, detalės apsilydo ir įvyksta dalelių susirišimas. Šis susirišimo mechanizmas kartais vadinamas skystosios fazės sukepinimu. Aplink esantys milteliai išlieka biraus būvio ir veikia kaip atrama gamybos proceso metu. Kai vieno sluoksnio skersinio pjūvio sukepinimas yra baigtas, gamybos padėklas arba platforma yra nuleidžiama žemyn atstumu, kuris atitinka vieno sluoksnio storį (paprastai 0,1 mm) ir ritinėliu yra paskleidžiamas papildomas miltelių sluoksnis ant lazeriu sukepto sluoksnio. Šis naujas sluoksnis tada yra sukepinamas ant ankstesnio sluoksnio ir procesas šitaip kartojamas kol yra pagaminama norimos formos detalė (Kenzari et al., 2012).

SLS technologija, paprastai yra naudojama polimerinėms medžiagoms apdoroti, tačiau ji taip pat gali būti naudojama keramikai, vašku, nailonui, metalų ir polimerų milteliams, plienams ar jų lydiniams (Karayel ir Bozkurt, 2020).

1.1.2. SLM technologija

Selektyvusis sulydymas lazeriu (SLM) yra vienas iš miltelių sluoksnio sintezės procesų, kurie plačiai naudojami adityviosios gamybos pramonėje (Gokuldoss, Kolla ir Eckert, 2017). SLM technologiją galima naudoti visose gaminio kūrimo etapuose – nuo dizaino koncepcijos, prototipo kūrimo iki mažos apimties gamybos (Yadroitsev ir Smurov, 2010).

SLM yra unikali technologija, leidžianti gaminti sudėtingos geometrijos objektus iš metalo miltelių ir miltelių medžiagai prilygstančiomis mechaninėmis savybėmis (Yadroitsev ir Smurov, 2010). Pagrindinis metodo principas yra plonų sluoksnių formavimas iš metalo miltelių lazeriniu skenavimu (1.1 pav.).



1.1 pav. Principinė SLM technologijos schema (Bremen, Meiners ir Diatlov, 2012)

SLM procesas susideda iš šių fizikinių reiškinių: lazerio spinduliuotės absorbcijos ir sklaidos; šilumos perdavimo; fazių virsmo; skysčio tekėjimo išlydytoje vonelėje, kurį sukelia paviršiaus įtempimo gradientas; medžiagos garavimo ir emisijos; cheminių reakcijų. SLM procesą nulemia daugybė parametų, įskaitant tokius kaip lazerio galia, lazerio skenavimo greitis, atstumas tarp skenavimo linijų (pastūma), sluoksnio storis, skenavimo strategija, darbinė proceso aplinka, miltelių sluoksnio temperatūra ir miltelių medžiaga. Visi jie turi įtakos sluoksnių ir takelių formavimo procesui (Yadroitsev ir Smurov, 2010). Lazerio galia, skenavimo greitis yra labai svarbūs parametrai norint pasiekti optimalias gaminio savybes, tokias kaip mažą porėtumą, didelį stiprį, kietumą ir kt. mechanines savybes (Karayel ir Bozkurt, 2020).

Šiuo metu SLM technologijos yra plačiai naudojamos kosmoso, aviacijos, automobilių, naftos, jūrinėje, statybų, maisto ir juvelyrinių dirbinių pramonėje.

Palyginus su įprastiniais gamybos būdais ši technologija turi daug privalumų: trumpesnis pateikimo rinkai laikas, didesnė gamybos sparta, universalumas, didelis detalių tikslumas, galimybė pagaminti didesnio funkcionalumo detales, turinčias unikalų dizainą ir miltelių medžiagai būdingas inžinerines savybes (Yadroitsev et al., 2007). Taip pat, tai perspektyvus metodas gaminti detales iš funkciškai diferencijuotų medžiagų (Yadroitsev ir Smurov, 2010). Tai tokios medžiagos, kurių sudėtis ir (arba) mikrostruktūra kinta erdvėje, siekiant kontroliuoti šiluminių, struktūrinių ar mechaninių savybių pokyčius (Anné, Vluegels ir Van der Biest, 2016).

Tačiau ši technologija turi ir trūkumų: procesas yra santykinai lėtas (dėl proceso greičio apribojimų), šiuo metu egzistuoja stambiagabaričių detalių gamybos apribojimai, didelės elektros energijos sąnaudos, didelės pradinės išlaidos, proceso parametrų optimizavimas užima daug laiko, medžiagų miltelių tvarkymas ir priežiūra gali būti sudėtingi, pagamintų detalių paviršius gali būti šiurkštus (priklauso nuo metalo miltelių dydžio ir proceso parametrų). Taip pat, naudojant trapių medžiagų kurios negali atlaikyti didelių vidinių įtempių gamybos proceso metu, miltelius, gali atsirasti įtrūkimų, sumažinti šią problemą galima mažinant aušimo greitį (naudojant substrato plokštės kaitinimą) (Gokuldoss et al., 2017).

SLM technologija yra plačiausiai naudojamas AM metodas, kuriuo galima apdirbti įvairias medžiagas, įskaitant aliuminio, geležies, titano, vario, kobalto ir nikelio pagrindo lydinius bei kt. (Prashanth, 2020). Paskutiniu metu yra labai populiari SLM technologiją taikyti detalių gamybai iš martensitinio sendinamo plieno (Hong et al., 2021).

1.2. Martensitiniai sendinami plienai

Martensitiniai senėjantys (sendinami) plienai yra patys stipriausi konstrukciniai plienai. Tai mažaangliai geležies ir nikelio (8–25 %) lydiniai, legiruoti aliuminiu, molibdenu, titanu, kobaltu ir chromu. Šie plienai yra labai stiprūs ir tšūs, tačiau jautrūs cheminės sudėties pokyčiams. Anglies kiekis pliene gali būti ne didesnis kaip 0,03 %, mangano ir silicio – 0,10 %, fosforo ir sieros – 0,01 %. Žemoje temperatūroje sumažėjus geležies legiravimo priemaišų tirpumui, martensite susidaro dispersinės fazės – intermetaliniai junginiai. Jie labai kietina ir stiprina plieną. Šis reiškinys vadinamas dispersiniu kietėjimu, o plienas vadinamas dispersiškai sendintuoju plienu (Valiulis A. V., 2007).

Šie plienai grūdinami įkaitinus iki 800–860 °C ir aušinant ore. Grūdinant austenitas virsta beangliu, legiruotu martensitu. Tokio martensito stiprumas yra 900–1100 MPa, o plastiškumo rodikliai $A = 18\text{--}20\%$, $Z = 75\text{--}85\%$. Sendinant užgrūdintą plieną 480–520 °C temperatūroje, jame vyksta dispersinio kietėjimo procesas – martensite išsiskiria sustiprinančios fazės Ni_3Ti , Ni_3Al , Fe_2Mo , Ni_2Mo ir kt. ir kt. Dėl to plieno stiprumas padidėja iki 1800–2000 MPa, kartu jis lieka pakankamai plastiškas ($A = 8\text{--}12\%$, $Z = 40\text{--}60\%$). Martensitinių senėjančių plienų eksploatacinių temperatūrų diapazonas labai platus – nuo kriogeninių iki 500 °C. Taip pat jie labai technologiški, jų įgrūdinamumas neribotas, gerai suvirinami. Užgrūdinti (prieš sendinimą) jie lengvai apdorojami pjovimu ir deformavimu (Juodelis, Benediktas ir Valiulis, 2004).

Plieno smūginis tūsumas ir atsparumas įtrūkiams yra apie du kartus didesnis už grūdintojo ir atleistojo didelio atsparumo plieno smūginį tūsumą ir atsparumą įtrūkiams. Plieno smūginis tūsumas labai priklauso nuo priemaišų kiekio (Valiulis, 2007).

Martensitinis senėjantis plienas naudojamas prietaisų spyruoklėms, aviacijos ir aerokosminių aparatų detalėms gaminti, kriogeninėje technikoje, branduolinėje energetikoje, todėl labai svarbus ne tik šio plieno stiprumas, bet ir jo suvirininamumas. Iš šio plieno gaminami strypai, plokštės, lakštai, vamzdžiai, kalami įvairūs gaminiai. Sendinamas plienas tik šiek tiek keičia matmenis, todėl tinka matavimo įrankiams gaminti (Valiulis, 2007).

Martensitiniai sendinami plienai labai tinka gamybai SLM ir SLS technologijomis. Makso Planko instituto Vokietijoje profesorių komanda nurodo dvi to priežastis:

- Pirma, juos, kaip medžiagas su martensitine matrica, reikia greitai grūdinti iš austenitinės srities iki žemesnės nei martensito pradžios temperatūros. Dėl mažo lydalo vonelės dydžio SLM proceso metu (lyginant su substrato dydžiu), aušimo greičiai dažniausiai yra labai dideli (103–108 K/s).
- Antra priežastis yra tai, kad sendinami plienai dėl savo brangios kainos daugiausia buvo naudojami aerokosminėje ir įrankių gamybos pramonėje. Šiose pramonės srityse dažnai reikalingi geometriškai sudėtingi komponentai pasižymintys puikiomis mechaninėmis savybėmis, nebūtinai dideliais kiekiais. Tai yra reikalavimai, kuriuos SLM procesas gali puikiai patenkinti (Jäggle, Choi, Humbeeck ir Raabe, 2014).

SLM būdu pagamintos detalės iš martensitinio sendinamo plieno turi gerokai didesnę takumo ir stiprumo ribą, nei iš tos pačios medžiagos termiškai neapdorotos įprastiniais būdais (pjovimu, tekinimu ir kt.) pagamintos detalės (Jäggle et al., 2014).

Taip pat, jungtinė mokslininkų komanda iš Jungtinių Amerikos Valstijų, Kanados, Brazilijos ir Vokietijos, pažymi, kad martensitiniai senėjantys plienai yra viena iš populiariausių medžiagų, naudojamų gamybai SLM technologija, gaminant tokias detales kaip konforminiai aušinimo vamzdžiai ir pan. (Bodziak et al., 2019).

1.2.1. Martensitinis sendinamas plienas 1.2709

Martensitinis sendinamas plienas 1.2709 plienas yra ypač didelio stiprumo ir priklauso įrankinių plienų klasei. Šio plieno puikias savybes lemia intermetalinių junginių – dispersinių fazių susidarymas terminio apdorojimo (sendinimo) metu. Šis plienas nėra atsparus korozijai.

Pagrindinis legiruojamasis elementas yra nikelis, o antriniai intermetalinius junginius sudarantys elementai yra kobaltas, molibdenas ir titanas. Martensitinio sendinamo plieno 1.2709 miltelių, skirtų SLS ar SLM gamybai cheminė sudėtis pateikta 1.1 lentelėje remiantis gamintojo „PROTOLABS“ pateikiama specifikacija.

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

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

Martensitinis sendinamas 1.2709 markės plienas pagal cheminę sudėtį atitinka Jungtinių Amerikos valstijų klasifikacijos (18 % Ni) žymėjimą 300 (18Ni300 arba M300), pagal Europos standartų žymėjimą DIN 1.2709 ir pagal Vokietijos žymėjimą X3NiCoMoTi 18–9–5.

Termiškai apdorojant 1.2709 markės plieną iš pradžių atliekamas homogenizacinis plieno atkaitinimas 820 °C temperatūroje. Aušinamas ore austenitas virsta martensitu, turinčiu kubinę erdvę centruotą (KEC) gardelę. Įkaitinus plieną iki 480 °C ir išlaikius šioje temperatūroje 3-12 h (dirbtinai sendinant), iš martensito kietojo tirpalo skiriasi naujos fazės – metališkieji junginiai. Po sendinimo plienas aušinamas ore (Valiulis, 2007).

Pagrindinės mechaninės 1.2709 markės plieno savybės prieš ir po terminio apdorojimo pateikiamos 1.2 lentelėje remiantis gamintojo „PROTOLABS“ specifikacijomis.

1.2 lentelė. Pagrindinės martensitinio sendinamo plieno 1.2709 mechaninės savybės

	Stiprumo riba, MPa	Takumo riba 0.2%, MPa	Maksimalus santykinis pailgėjimas, %	Kietumas, HRC
Be terminio apdirbimo	1100 MPa ±100 MPa	1000 MPa ±100 MPa	8 % ± 3 %	33–37
Po terminio apdirbimo (sendinimo)	1950 MPa ±100 MPa	1900 MPa ±100 MPa	2 % ± 1 %	50–54

Kitos fizikinės martensitinio sendinamo 1.2709 markės plieno savybės:

- tankis $\rho = 8000\text{--}8100 \text{ kg/m}^3$;
- 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 $E = 160 \text{ GPa}$;

- Puasono koeficientas $n = 0,3$;

Tipinis 1.2709 markės plieno panaudojimas yra įvairių įrankių, tokių kaip injekcinio liejimo, paprastojo liejimo, štapavimo, karštojo presavimo, ekstruzijos formų gamyboje. Taip pat 1.2709 markės plienas yra naudojamas transmisijų velenams, raketų varikliams ir kovinių raketų korpusams, lengvųjų orlaivių važiuoklėms ir automobilių sporto komponentams gaminti. Jis idealiai tinka funkciniais metalo prototipams, mažų serijų gaminiais ar atsarginėms detalėms, pasižyminčioms atsparumu tempimui. Detales galima apdirbti, suvirinti, šlifuoti, poliruoti ir dengti.

1.2709 arba 18Ni300 plienas, yra plačiausiai adityvioje gamyboje lazeriu (LAM) naudojamas martensitinis sendinamas plienas, šiam plienui taip pat labai daug dėmesio skiriama SLM technologijų srityje. Taikant SLM sėkmingai pagamintos aukštos kokybės 18Ni300 plieno (santykinis tankis $> 99\%$) detalės, kurių mechaninės savybės panašios į įprastais, tradiciniais būdais pagamintų detalių. Tačiau, SLM technologija pagamintų 1.2709 plieno detalių paviršiaus mechaninės savybės išlieka nepageidaujamos, ypač lemiančios atsparumą dilimui (Hong et al., 2021).

1.3. Klasikiniai martensitinio sendinamo plieno paviršiaus kietinimo būdai

1.3.1. Azotinimas (Nitravimas)

Plienų azotinimas yra detalių paviršinių sluoksnių įsotinimas azotu. Dujinis įazotinimas yra pagrindinis ir dažniausiai, bei plačiausiai taikomas martensitinių sendinamų plienų paviršiaus kietinimo būdas pramonėje (Selg et al., 2013). Azotinimas padidina detalių paviršiaus kietumą, pasipriešinimą dilimui, patvarumo ribą sukant ir lenkiant bei korozinį atsparumą ore, vandenyje, vandens garuose ir pan. Įazotintas sluoksnis išlaiko kietumą iki 450–550 °C, todėl šiuo būdu galima sustiprinti ir tokias detales, kurios dirba aukštesnėje temperatūroje, pvz.: cilindų gilzės, turbinų velenai ir pan. Prieš azotinimą plienai termiškai gerinami, atliekant grūdinimą ir aukštąjį atleidimą. (Juodelis et al., 2004).

Pagrindiniai šiuo metu gamyboje naudojami azotinimo atlikimo būdai:

- Dujinis azotinimas.

Tai dažniausiai naudojamas procesas gaminiais įazotinti. Dujiniam azotinimui yra naudojami amoniako arba amoniako – vandenilio mišiniai. Įsotinimas azotu atliekamas 500–650

°C temperatūroje. Amoniakas lengvai disocijuoja į dujinį azotą ir vandenilį. Iš amoniako į plieną patenka ir difunduoja azoto atomai (Schaaf, Kaspar ir Höche, 2014). Dalis azoto atomų tirpsta ferite ir jį sustiprina, o likusi dalis su geležimi sudaro nitridus Fe_2N , Fe_4N . Geležies nitridai ne itin kieti, jų kietumas nuo 450 iki 550 HV, todėl jie mažai tesustiprina plieną (Juodelis et al., 2004).

- Įazotinimas druskų voniose (cianavimas).

Šis procesas yra panašus į dujinį įazotinimą amoniako mišiniuose, tik šiame procese azoto aktyvumas atsiranda iš skystų druskos tirpalo vonių, kuriuose ištirpdytos druskos turinčios reaktyviojo azoto (cianidai, cianatai) (Schaaf et al., 2014).

- Įazotinimas plazma.

Tai toks paviršiaus modifikavimo procesas, kuriame naudojama rusenančiojo išlydžio technologija azoto atomams įterpti į metalo paviršių, kurie toliau difunduoja į medžiagos vidų. Dėl smarkiai pagerinamų martensitinio sendinamo plieno savybių šis metodas tapo labai populiarus. Atliekant įazotinimą plazma, vakuumo kameroje bandinys ir jo paviršius yra įelektrinamas neigiamai iki kelių tūkstančių voltų, ir tuo metu į kamerą yra tiekiamos labai nedidelio slėgio ($10^{-2} - 10^2$ Pa) azoto dujos, arba azoto dujų mišinys. Dėl aukštos įtampos užsidega rusenantis išlydis. Dėl išlydžio ir dėl elektrinio potencialo gradiento, dujos jonizuojasi ir azoto jonai yra nukreipiami ir pagreitinami link neigiamai įelektrinto paviršiaus. Jie bombarduoja metalo bandinių paviršių ir jį papildomai įkaitina kinetinę energiją paversdami šiluma. Atsitrenkę į bandinių paviršių atomai difunduoja į medžiagos vidų suformuodami įazotintą sluoksnį. Vienas iš privalumų yra tai, kad vienodas paviršiaus apdorojimas nepriklauso nuo bandinio geometrijos ir formos, todėl efektyviai gali būti apdirbami ir sudėtingų formų gaminiai (Schaaf et al., 2014). Šiam procesui atlikti reikalinga vakuumo kamera su plazmos, slėgio ir temperatūros reguliavimo mechanizmais. Atliekant įazotinimą, plazma suformuojama didelio kietumo zona medžiagos paviršiuje, kuri susideda iš difuzijos zonos ir jungiamojo sluoksnio.

- Jonų implantavimas.

Naudojant šią technologiją, bandinių paviršius yra bombarduojamas jonais arba molekulėmis su tiek energijos, kad užtektų prasiskverbti pro medžiagos paviršių ir įsiterpti tarp kitų atomų.

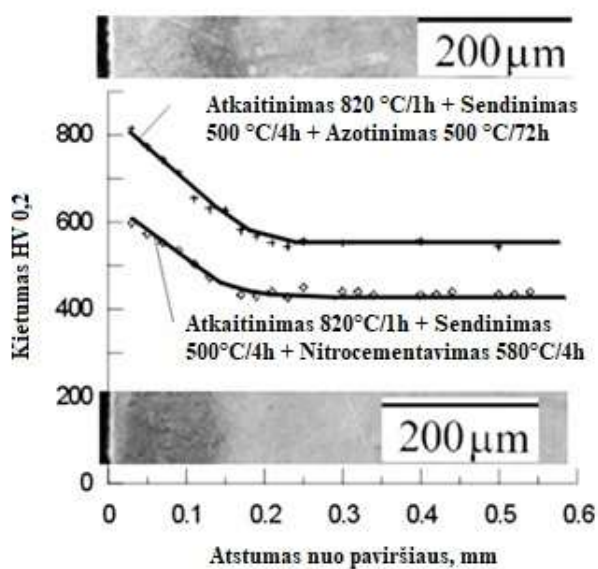
- Įazotinimas lazeriu (dujinėje aplinkoje).

Šia technologija galima apdoroti nedidelius ir lokalius bandinių paviršiaus plotus, tai yra labai naudinga, jeigu medžiaga yra jautri šilumai. Paviršiaus įazotinimas vyksta, kai trumpais

lazerio impulsais virš bandinio sukuriama plazma ir joje vyksta komplikuota lazerio – plazmos – medžiagos sąveika (Schaaf et al., 2014).

Zagrebo universitete, martensitinis sendinamas plienas 14–10–5 buvo atkaitintas, sendintas ir poto azotintas plazmoje apytiksliai 500 °C temperatūroje, kuri patenka į martensitinių sendinamų plienų tipo sendinimo temperatūrų diapazoną. Tai padidino plieno atsparumą abrazyviniam ir eroziniam nusidėvėjimui labiau, negu standartinis atkaitinimas ir sendinimas. (Cajner et al., 2009). Buvo pasiektos 600–800 HV kietumo vertės iki 0,2 mm gylio (1.3 pav.). Azotinimas atliktas neaukštoje temperatūroje, todėl buvo sėkmingai išlaikytos bandinio šerdies stipruminės savybės.

Zagrebo universiteto mokslininkai, atlikdami tyrimus nustatė, kad po įazotinimo plazmoje, martensitinių sendinamų plienų bandinių atsparumas korozijai, kai jie veikiami druskų „rūko“ (testas, kai bandiniai yra apipurškiami 5 % NaCl druskos vandeniniu tirpalu), padidėjo tris kartus lyginant su standartiškai atkaitintu ir sendintu bandiniu (Cajner et al., 2009).



1.2 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 bandinio paviršiaus kietumo pasiskirstymas ir mikrostruktūra. Viršutinėje kreivėje po azotinimo proceso, apatinėje – po nitrocementavimo (Cajner et al., 2009)

Pagrindiniai azotavimo taikymo kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Procesas yra atliekamas sąlyginai žemoje temperatūroje, todėl nevyksta terminiai medžiagos struktūros pokyčiai.
- Azotintas paviršiaus sluoksnis pasižymi didesniu kietumu ir atsparumu dilimui, nei sluoksnis, sukietintas kitomis tradicinėmis technologijomis.
- Įazotintas sluoksnis išlaiko kietumą sąlyginai aukštesnėse temperatūrose (450–550 °C).
- Įazotintas sluoksnis taip pat suteikia atsparumo korozijai.
- Įazotavimas plazma arba lazeriu yra efektyvus būdas pasiekti gana gerus paviršiaus kietumo rezultatus.

Trūkumai:

- Įazotintas sluoksnis yra plonesnis ir trapesnis negu cementuotas, todėl blogiau priešinasi kontaktiniams įtempimams.
- Procesas yra labai ilgas.
- Įazotavimas druskų voniose yra brangus procesas, nes medžiagos (druskos turinčios CN grupę) yra brangios, o jų šalinimas ir utilizacija yra neekologiška ir kenksminga aplinkai.
- Norint atlikti paviršiaus įazotinimą lazeriu ar plazma, reikalinga brangi įranga ir įgudę specialistai.

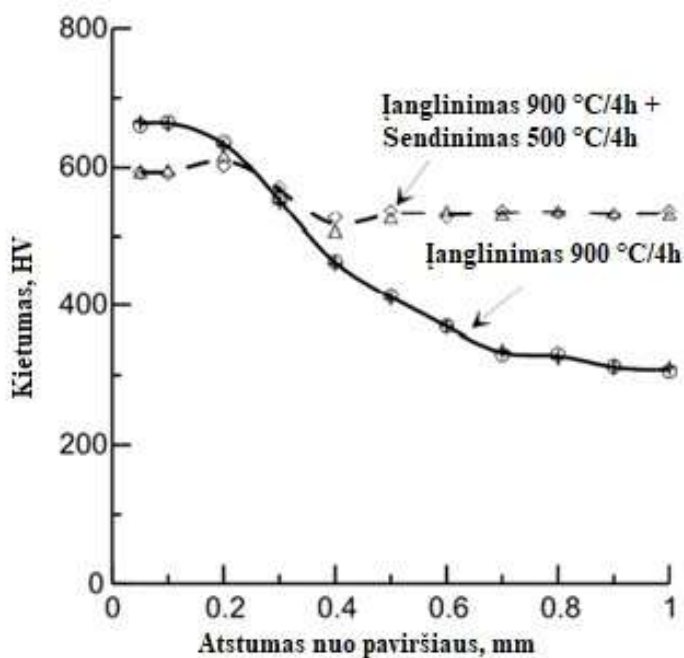
1.3.2. Cementavimas (įanglinimas)

Cementavimas yra paviršinio sluoksnio difuzinis įsotinimas anglimi. Įanglintos detalės turi didesnę patvarumo ribą sukant ir lenkiant, atsparesnės kontaktiniam dėvėjimuisi. Plienų paviršiniai sluoksniai gali būti įsotinami anglimi iki 0,9–1 %. Vidutinis įanglinimo gylis būna nuo 0,5 mm iki 2 mm. Per valandą apytikriai įanglinama 0,1 mm (Juodelis, 2004).

Plienų cementavimas atliekamas krosnyse. Įanglinančios terpės vadinamos karbiurizatoriais. Yra du pagrindiniai cementavimo būdai: kietame ir dujiniame karbiurizatoriuje. Abiem atvejais įanglinimas vyksta per dujinę fazę. Taip pat dujinei įanglinančiai aplinkai sukurti gali būti panaudojami ir skysčiai, turintys daug angliavandenilių. Cementavimas gali būti atliekamas vakuume arba plazminėje aplinkoje.

Įanglinamas plienas turi būti austenitinėje būsenoje, kitaip jame netirps anglis. Dėl to temperatūra cementavimo krosnyje turi būti aukštesnė už cementuojamo plieno kritinę A_3 temperatūrą. Dažniausiai cementavimas vyksta 850–950 °C temperatūroje. Paviršiaus sukietinimas yra pasiekiamas, kai anglies prisotinti paviršiaus sluoksniai yra termiškai apdorojami, t.y. užgrūdinami suformuojant martensitinę struktūrą (Bepari, 2017).

Martensitinių sendinamų plienų cementavimas pramonėje naudojamas retai, dažniausiai tokios technologijos taikymas atliekamas tik laboratorijose moksliniais tikslais. Zagrebo universiteto mokslininkai atliko martensitinio sendinamo plieno 14–10–5, turinčio apytiksliai 14 % nikelio, 10 % kobalto ir 5 % molibdeno, įanglinimą. Įanglinimas atliktas atkaitinimo temperatūrų intervale. Ataušinus, paviršiniuose sluoksniuose randamas didelės anglies koncentracijos martensitas su padidėjusiu kietumu (ir tikėtinu likučiu austenito). Pilnas įanglinto sluoksnio gylis martensitiniame sendintame pliene 14–10–5 siekia 0,8 mm (1.2 pav.). Atliekant papildomą sendinimą padidintas šerdies kietumas (Cajner, Landek ir Leskovšek, 2009). Įanglintame sluoksnyje kietumas iki 0,2 mm gylio siekia 600–700 HV, o nuo 0,3 mm iki 0,6 mm gylio – kietumo reikšmė yra apytiksliai 400 HV.



1.3 pav. Kietumo pasiskirstymas įanglintuose martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 bandiniuose (Cajner et al., 2009)

Pagrindiniai cementavimo taikymo kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Įanglinant pasiekiamas didesnis kietumas negu vien atliekant terminį apdirbimą (sendinant). Pasiekiamas geresnis atsparumas dilimui.
- Naudojant dujinį karbiurizatorių, galima gana lengvai įanglinti sudėtingas detales ir jų paviršius.
- Kai kaip karbiurizatorius panaudojami dujos ar skysčiai, pasiekiamas tolygus įanglininto sluoksnio gylis. Netgi nedidelio galingumo krosnyse pasiekiami geri kietinimo rezultatai, susidaro mažiau paviršiaus struktūros išsikraipymų ir įtrūkimų, negu naudojant kietą karbiurizatorių.
- Procesas nesudėtingas, todėl nedideli fizinio darbo kaštai.

Trūkumai:

- Pagrindinis šio būdo trūkumas – procesas vyksta labai aukštoje temperatūroje, kurioje pasikeičia medžiagos struktūra ir prarandamos teigiamos stipruminės martensitinio sendinamo plieno savybės.
- Cementavimas yra lėtas ir ilgai trunkantis procesas.
- Sudėtingas stambiagabaričių gaminių įanglinimas, nes reikalingos labai didelės krosnys.
- Vykstant procesui išsiskiria nemažai nuodingų ir kenksmingų dujų, todėl yra reikalinga dujų šalinimo sistema. Kai naudojamas skystis – išsiskiria pavojingos druskos, kurių šalinimas, saugojimas ir utilizavimas yra brangus.

1.3.3. Nitrocementavimas ir cianavimas

Plieno nitrocementavimas yra procesas, kai gaminio paviršinis sluoksnis įsotinamas anglies ir azoto atomais. Toks apdorojimas padidina detalių paviršiaus kietumą, jo pasipriešinimą dilimui, patvarumo ribą, šiek tiek padidina korozinį atsparumą. Nitrocementavimo technologija, kaip ir cementavimo, pramonėje termiškai apdirbant martensitinius sendinamus plienus taikoma retai, dažniausiai su šiuo procesu atliekami moksliniai tyrimai laboratorijose.

Šis procesas atliekamas dujinio cementavimo krosnyse į cementavimo dujas pridedant amoniako. Nitrocementavimo temperatūra šiek tiek žemesnė negu cementavimo – 840–860 °C.

Tokioje temperatūroje gaunama optimali 1–1,65 % anglies ir azoto koncentracija. Azotas intensyvina anglies difuzijos procesus pliene, todėl nitrocementuojant sluoksnis greičiau įsianglina. Dažniausiai nitrocementavimas trunka nuo 4 iki 10 valandų. Per šį laiką įsotinamas 0,2–0,8 mm paviršinis sluoksnis. Baigus įsotinimą, detalės yra grūdinamos ir atleidžiamos 160–180 °C temperatūroje.

Teisingai atlikus terminį apdorojimą, įsotinto sluoksnio struktūrą sudaro smulkiaadatinis martensitas, smulkūs karbonitridai ir 25–30 % liekamojo austenito. Austenitą galima pašalinti užgrūdintas detales šaldant (Juodelis et al., 2004).

Nitrocementavimas yra labai plačiai taikomas automobilių, traktorių ir sunkiosios technikos pramonėje, krumpliaračių ir kitų, nešlifuojamų, dylančių detalių sustiprinimui (Juodelis et al., 2004).

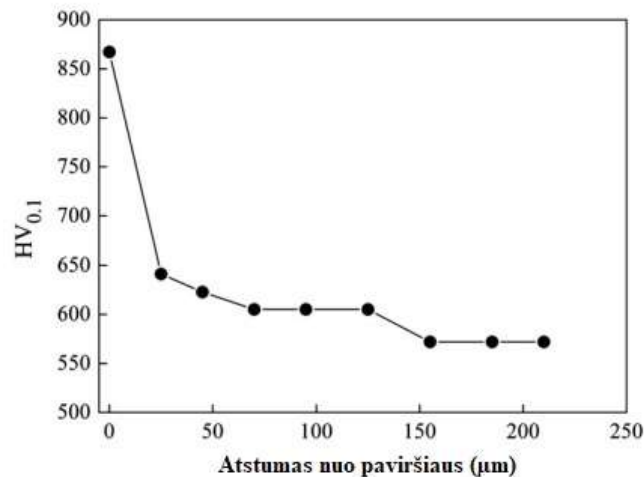
Kai procesas atliekamas ne dujinėje, o skystoje terpėje – išlydytose druskose, turinčiose CN grupę, jis vadinamas cianavimu. Dažnai šiam procesui atlikti yra naudojamas natrio cianatas NaCN. Cianatai yra nuodingi ir lydosi žemoje temperatūroje. Cianavimo procesui atlikti reikalinga aukšta temperatūra (820–860 °C), todėl jie yra maišomi su kitomis druskomis, kad būtų pakelta jų lydymosi temperatūra ir cianatai taip sparčiai negaruotų.

Atlikus cianavimą, kaip ir po nitrocementavimo, bandinius reikia grūdinti ir poto atleisti 160–180 °C temperatūroje. Atliekant cianavimą, per 1 val. pasiekiamas apytiksliai 0,3 mm storio įsotintas sluoksnis. Lyginant su cementuotu, cianuotas sluoksnis yra atsparesnis dilimui ir labiau padidina plieno patvarumo ribą. Dažniausiai taikomas smulkių detalių sustiprinimui (Juodelis et al., 2004).

Zagrebo universiteto mokslininkai atliko martensitinio sendinamo plieno paviršiaus apdorojimą, tiriamojo plieno bandinį atkaitindami 820 °C temperatūroje 1 valandą, poto jį sendindami 4 valandas 500 °C temperatūroje ir 4 valandoms panardindami bandinį į TENIFER (Alkalio cianato (OCN^-)) druskų vonią 580 °C temperatūroje, kurioje buvo atliekamas nitrocementavimo (cianavimo) procesas (Cajner et al., 2009).

Naudojant šį paviršiaus apdorojimą buvo pasiektos 400–600 HV kietumo vertės iki 0,2 mm gylio (1.3 pav.). Zagrebo universiteto mokslininkai pastebi, kad atliekant nitrocementavimą įvyko bandinio šerdies persendinimas, dėl aukštos proceso atlikimo temperatūros. Tai nulėmė sumažėjusį šerdies kietumą (iki 400 HV_{0.2}) ir atsparumą abrazyviniam ir eroziniam dilimui (Cajner et al., 2009).

Kinijos mokslininkai Y.Q. Wu ir M.F. Yan atliko martensitinio sendinamo plieno 18Ni nitrocementavimą 460 °C temperatūroje, proceso trukmė – 4 valandos. Atlikę apdorotų bandinių tyrimus, mokslininkai nustatė, kad nitrocementuotų paviršių mikrokietumas padidėjo 200 %, o šerdies apie 130 %, lyginant su bandiniu, kuris nebuvo nitrocementuotas, mokslininkų nustatytos mikrokietumo vertės pateikiamos 1.4 pav. Taip pat mokslininkai pamini, kad paviršinių sluoksnių plastiškumo faktorius sumažėjo apie 20 % po nitrocementavimo proceso (Wu ir Yan, 2011).



1.4 pav. Nitrocementuoto martensitinio sendinamo plieno bandinio skerspjūvio mikrokietumo pasiskirstymas (Wu ir Yan, 2011)

Pagrindiniai nitrocementavimo ir cianavimo taikymo kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Lyginant su azotinimu, procesas yra trumpesnis.
- Žemesnė proceso temperatūra negu atliekant cementavimą, todėl apdorojamos detalės mažiau deformuojasi.
- Nitrocementuotas sluoksnis truputį atsparesnis dilimui ir korozijai negu cementuotas.
- Galima apdirbti sudėtingos formos detales.

Trūkumai:

- Pagrindinis šio būdo trūkumas kaip ir cementavimo, yra tai, kad procesas vyksta aukštoje temperatūroje, kurioje pasikeičia medžiagos struktūra ir prarandamos teigiamos martensitinio sendinamo plieno savybės.
- Nors proceso laikas yra trumpesnis nei cementavimo, tačiau jis vistiek pakankamai ilgas.

- Kaip ir anksčiau paminėtuose procesuose, sudėtingas stambiagabaričių gaminių apdorojimas.

1.3.4. Borinimas

Borinimas yra metalų paviršinių sluoksnių difuzinis įsotinimas boru, šiuos metalus laikant atominį borą išskiriančioje aukštos temperatūros aplinkoje. Tai didina plieno paviršinių sluoksnių kietumą ir atsparumą dilimui, ypač kai detalės ar įrankiai dirba sunkiomis sąlygomis: kai yra sausa arba abrazyvinė trintis, aukštesnė temperatūra arba agresyvi aplinka, taip pat vakuume. Įborinti paviršiai išlaiko kietumą iki 700 °C, o patvarumą oksidacijai kaitroje ir iki 800 °C (Kulikauskas, 1997). Kaip ir anksčiau minėti cementavimas ir nitrocementavimas, borinimo technologija martensitinių sendinamų plienų apdorojimui pramonėje taikoma retai, dažniausiai taikant šį procesą atliekami moksliniai tyrimai laboratorijose.

Daugumai geležies pagrindo medžiagų borinimo procesas vykdomas aukštose temperatūrose, virš kritinio taško AC_3 temperatūros. Padidėjęs kietumas atsiranda dėl boridų formavimosi, kuris vyksta sąveikaujant boro ir geležies atomams, taip pat borui jungiantis su legiruojamaisiais elementais, tokiais kaip nikelis, kobaltas, molibdenas, volframas ir titanas. Ši sąveika suformuoja sudėtinį geležies boridų sluoksnį, turintį labai didelį kietumą, kuris kartu su šio junginio mikrostruktūra pasireiškia labai dideliu atsparumu dilimui. (Winter, Kalucki ir Koshel, 2015).

Suformuoto boridų sluoksnio storis daro įtaką apdoroto plieno mechaninėms ir cheminėms savybėms, jis priklauso nuo borinimo temperatūros, išlaikymo trukmės, boro potencialo esančio aplink apdorojamo bandinio paviršių ir cheminės apdorojamojo plieno sudėties (Campos-Silva ir Rodrigue-Castro, 2015).

Boro atomų prisotintai aplinkai sukurti gali būti naudojami skystos, dujinės ar kietosios fazės (milteliniai mišiniai) šaltiniai. Dėl mažo našumo ir pavojų atsirandančių vykdant borinimo procesą skystoje terpėje ar dujinėje aplinkoje šie procesai nėra plačiai naudojami. Kaip perspektyvi technologija šiuo metu testavimo fazėje yra borinimas plazmoje. Šiai dienai, vienintelis procesas suteikiantis naudingiausius rezultatus praktikoje yra borinimas naudojant kietąjį boro fazę – boro atomo miltelius ir jų mišinius (Campos-Silva ir Rodriguez-Castro, 2015). Borinama sudėjus detales į sandarius konteinerius ir įstačius į krosnį.

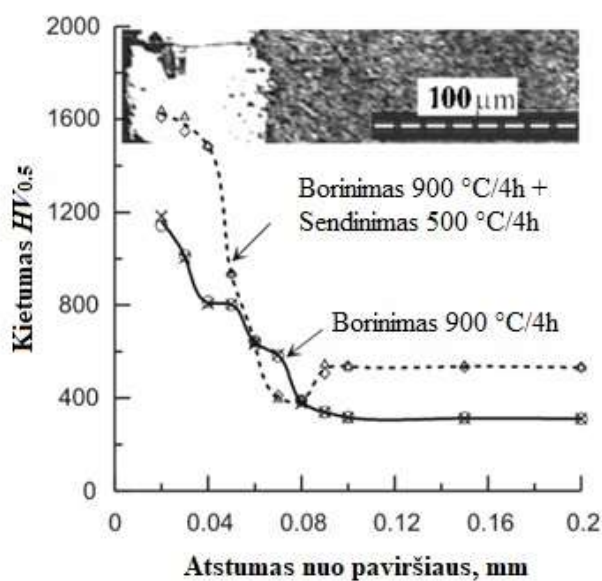
Nesudėtingos formos ir vidutinio dydžio gaminių masinėje gamyboje borinimas gali būti vykdomas elektrolizės būdu. Elektrolizinis borinimas atliekamas išlydytame borakse $Na_2B_4O_7$

arba jo mišinyje. Elektrolizinio borinimo trūkumas – didelės borakso sąnaudos ir trumpas tiglo darbo amžius, taip pat netinka sudėtingos formos gaminiais (Kulikauskas, 1997).

Anskčiau minėta Zagrebo universiteto mokslininkų komanda atliko martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 bandinių borinimą, 900 °C temperatūroje išlaikant bandinius 4 valandas. Tyrimą mokslininkai atliko vieną bandinį papildomai sendindami 4 valandas 500 °C temperatūroje, norėdami ištirti kokią įtaką kietumui daro sendinimas po borinimo. 1.5 pav. pateikiami abiejų bandinių kietumo tyrimo rezultatai. Mokslininkai nustatė, kad buvo suformuotas apytiksliai 50 µm boridų sluoksnis labai didelis kietumas šiame sluoksnyje (1000 HV_{0.5} ir daugiau), taip pat šis sluoksnis pasižymėjo dideliu atsparumu eroziniam dilimui, bei padidėjusiu atsparumu abrazyviniam dilimui (Cajner et al., 2009).

Kartu su akivaizdžiais metodo privalumais, mokslininkai įvardija ir pastebimus tokio martensitinio sendinamo plieno apdorojimo trūkumus: minkštosios zonos atsiradimas iškart po boridų sluoksnio, skersinių įtrūkių atsiradimą boridų sluoksnyje ir matmenų tolerancijų viršijimo riziką (Cajner et al., 2009). Kadangi borinimo metu pasiektas labai didelis kietumas, todėl geometrinių matmenų koregavimas po borinimo gali būti sudėtingas.

Taip pat iš pateikto grafiko galima pastebėti, kad papildomas sendinimas po borinimo proceso suteikė paviršiui didesnę kietumą, tačiau po papildomo sendinimo atsirado minkštoji zona po boridų sluoksniu. Lyginant su nesendintu bandiniu, šerdies kietumas taip pat padidėjo.



1.5 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 mikrostruktūra ir kietumo pasiskirstymas po borinimo (Cajner et al., 2009)

Pagrindiniai borinimo taikymo kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Ekologiškas ir saugus aplinkai procesas, nes į aplinką neišmetamos kenksmingos dujos ar kiti teršalai.
- Pasiekiamos labai didelės kietumo ir atsparumo dilimui vertės.
- Įborintų anglinių plienų patvarumas padidėja iki 10 kartų, o legiruotų 3–4 kartus.
- Borinimas milteliniuose mišiniuose yra nesudėtingas, nereikalinga sudėtinga įranga.
- Plienų paviršius gali būti įborinamas kartu įsotinant ir kitus elementus.

Trūkumai:

- Pagrindinis šio proceso trūkumas, tai, kad jis vyksta aukštoje temperatūroje ir dėl šios priežasties pakinta medžiagos struktūra ir kitos jos mechaninės savybės.
- Įborinant tradiciniais metodais po boridų sluoksniu susiformuoja silpnoji zona.
- Gali atsirasti skersinių įtrūkimų boridų sluoksnyje.
- Sluoksnis pasiskirsto netolygiai, todėl gali būti viršijamos matmenų tolerancijos. Dėl labai smarkiai padidinto paviršinio kietumo, šiuos matmenų defektus panaikinti yra ganėtinai sudėtinga.
- Borinimas skystoje terpėje tinka sudėtingos formos gaminiams įsotinti, bet yra lėtas, greit išsenka vonios aktyvumas, todėl taikomas retai.
- Borinimas milteliniuose mišiniuose yra mažo našumo, reikalauja daug paviršiaus paruošiamųjų darbų, mišiniai yra ganėtinai brangūs.
- Dujinėje aplinkoje borinama retai, nes naudojamos toksiškos, sprogios medžiagos, susidaro netolygaus gylio bei paviršinio kietumo sluoksnis.

1.3.5. PVD dangų technologija

PVD (angl. *physical vapor deposition*) yra fizikinis garų nusodinimas ant paviršiaus.

Fizikiniai garų nusodinimo procesai (dažnai vadinami plonų dangų (plėvelių) procesai) yra atominiai nusodinimo procesai, kuriuose dangos medžiaga yra išgarinama iš kieto arba skysto šaltinio atomų arba molekulių pavidalu. Išgarinti atomai ir molekulės fiziniu metodu vakuume arba mažo slėgio dujinėje (plazminėje) aplinkoje transportuojami garų pavidalu link substrato

paviršiaus, ant kurio nusėda ir kondensuojasi. Dažniausiai PVD procesai naudojami nusodinti dangoms, kurių storis yra nuo kelių iki kelių tūkstančių nanometrų, taip pat taikant PVD gali būti formuojamos daugiasluoksnės, įvairių struktūrų dangos (Mattox, 2010).

Dažniausiai naudojami fizikinio nusodinimo metodai yra vakuuminis garinimas, jonapluoštis dulkinimas, lankinis nusodinimas garais ir dengimas jonais.

- Vakuuminis nusodinimas arba vakuuminis garinimas.

Tai toks PVD procesas, kuriame dangos medžiaga išgarinama dėl šiluminės energijos poveikio ir išgarintų dalelių srautas transportuojamas link substrato paviršiaus su labai mažu arba nuliniu susidūrimų skaičiumi su kitų dujų dalelėmis. Išgarintų dalelių trajektorija (kelias) iki substrato paviršiaus yra vadinamas dalelių pernešimo distancija. Vakuuminė aplinka taip pat leidžia sumažinti dangos užteršimą kitomis dujų molekulėmis iki labai žemo lygio (Mattox, 2010).

Vakuuminis garinimas naudojamas suformuoti optinės interferencijos dangoms, veidrodinėms dangoms, dekoratyvinėms dangoms, nepralaidžioms barjerinėms dangoms ant lanksčių pakavimo medžiagų, elektrai laidžioms dangoms, atsparioms nusidėvėjimui dangoms bei antikorozinėms dangoms.

- Dulkinimas.

Tai tokia PVD technologija, kai plazminėje dujų aplinkoje dangos medžiaga (taikiny) yra bombarduojama įgreitintų teigiamai įelektrintų jonų srautu. Dažniausiai, dangos medžiaga yra bombarduojama Ar^+ jonais. Jono susidūrimo su paviršiumi momentu, dalelės yra išmušamos iš kieto dangos medžiagos paviršiaus dėl momentinio energijos perdavimo. Dalelės išmušamos tuo atveju, jei bombarduojančių jonų kinetinė energija yra didesnė už taikinio medžiagos atomų ryšio energiją (Mattox, 2010). Išmuštos dalelės nusėda ant substrato ir formuoja dangą.

Dažniausiai, taikant šį procesą, dalelių pernešimo distancija yra mažesnė lyginant su vakuuminiu garinimu (Mattox, 2010).

Jonapluoštis dulkinimas yra plačiai naudojamas nusodinti metalinėms dangoms and puslaidininkių medžiagų (puslaidininkių metalizacija), dangoms ant statybinio stiklo suformuoti, taip pat reflektivioms kompaktinių diskų (CD) dangoms, magnetinėms dangoms, trintį mažinančioms slydimo dangoms, kietoms dangoms (ant įrankių, variklių detalių paviršių), bei dekoratyvinėms dangoms (Mattox, 2010).

- Lankinis nusodinimas garais.

Šiame metode naudojama didelio stiprumo srovė ir žemos įtampos lankas katodo (katodinis lankas) arba anodo (anodinis lankas) elektrodo išgarinimui. Išgarinta medžiaga nusodinama ant substrato paviršiaus. Išgarinta medžiaga yra stipriai jonizuota ir dažniausiai substratas traukia jonus pagreitindamas juos tiek, kad susiformuotų plona paviršinė dangos plėvelė ant substrato paviršiaus (Mattox, 2010).

Nusodinimas iš garų lanko yra naudojamas nusodinti kietas ir dekoratyvines dangas. Jonai „plonų dangų jonai“, kurie suformuojami lankiniame garinime yra naudingi joninio dengimo procese (Mattox, 2010).

- Dengimas jonais.

Šiame PVD procese yra kombinuojami vakuuminis garinimas ir dulkinimas, norint pasiekti geresnių suformuotos dangos rezultatų.

Dengimas jonais, kuris dažnai vadinamas nusodinimu jonais arba nusodinimu iš jonų garų, naudojamas nuosekliai arba periodiškai bombarduojant nusodinamąją plėvelę atominio dydžio energetinėmis dalelėmis, tam kad būtų modifikuotos ir kontroliuojamos nusodinamos plėvelės savybės. Dengimo jonais proceso metu svarbiausi kintamieji parametrai yra bombarduojančiųjų dalelių energija, srautas, masė, bei bombarduojančiųjų ir nusodinamųjų dalelių santykis. Nusodinamoji medžiaga gali būti išgarinama garinant, purškiant, išgarinant lanku arba skylant cheminiam garų prekursoriui (Mattox, 2010).

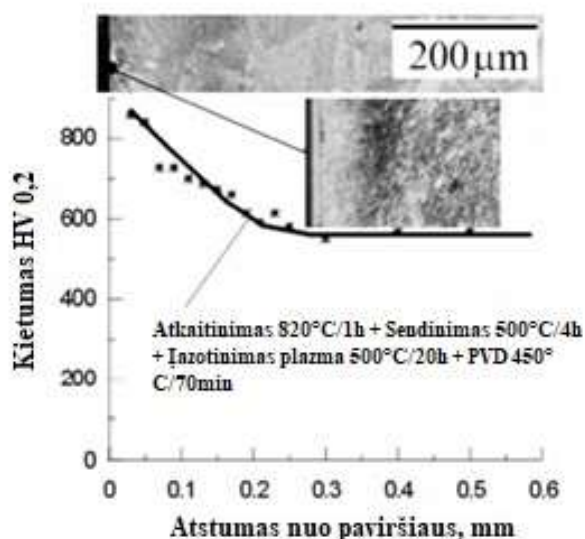
Bombardavimui naudojamos energinės dalelės paprastai yra inertinių ar reaktyviųjų dujų jonai, kai kuriais atvejais, nusodinamos plėvelės medžiagos jonai. Joninis padengimas gali būti atliekamas plazminėje aplinkoje, kai bombardavimui skirti jonai išgaunami iš plazmos, arba vakuuminėje aplinkoje, kai bombardavimui skirti jonai formuojami atskiroje „jonų patrankoje“. Naudojant reaktyviasias dujas plazmoje galima nusodinti sudėtinių medžiagų plėveles. Joniniu dengimu galima gauti tankias dangas esant santykinai dideliu dujų slėgiui, kai dujų sklaida gali padidinti paviršiaus padengimą (Mattox, 2010).

Dengimas jonais naudojamas sudaryti kietas sudėtinių medžiagų dangas, stiprioms adhezinėms metalų dangoms, didelio tankio optinėms dangoms, ir konforminėms dangoms ant sudėtingų paviršių nusodinti (Mattox, 2010).

Norėdami išsiaiškinti PVD dangų poveikį martensitams sendinamiems plienams, Zagrebo mokslininkų komanda, atliko martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 sudėtinį apdorojimą, bandinį atkaitinant 820 °C temperatūroje 1 valandą, poto sendinant 4 valandas 500 °C

temperatūroje ir taip pat šioje temperatūroje atlikdami 20 valandų trukmės bandinio paviršių įazotinimą plazmoje, po įazotavimo ant bandinio paviršiaus taikant PVD technologiją, per 70 min buvo nusodinta TiN danga.

Proceso metu pasiektas 1,8 μm storio PVD TiN dangos sluoksnis, kurios kietumas 800–850 HV (1.6 pav.). Šio kombinuoto proceso metu pasiektos labai panašios mikrokietumo vertės kaip ir atliekant martensitinio sendinamo plieno įazotinimą, tačiau bendra proceso trukmė yra beveik 50 valandų trumpesnė, taip pat tyrėjų komanda pažymi, kad bandinį apdorojant PVD technologija gauta kieta danga, kuri taip pat pasižymi dideliu atsparumu abrazyviniam, eroziniam ir adheziniam dilimui, taip pat ekstremaliai žemu trinties koeficientu. Slydimo koeficientas beveik 4 kartus mažesnis negu nitrocementuoto bandinio, ir 6–8 kartus mažesnis negu įazotinto paviršiaus. (Cajner et al., 2009). 1.6 pav. pateikiama šio bandinio paviršiaus mikrostruktūra ir kietumo matavimo rezultatai.



1.6 pav. Martensitinio sendinamo plieno 14–10–5 mikrostruktūra ir kietumo pasiskirstymas po kombinuoto paviršiaus apdorojimo įazotinant plazmoje ir padengiant PVD TiN danga (Cajner et al., 2009)

Pagrindiniai PVD dangų taikymo kietinant martensitinių sendinamų plienų paviršius privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Žema proceso temperatūra.
- Ekologiškas procesas.

- Pasiiekiami labai efektyvūs rezultatai.
- Vienu metu galima apdirbti kelias nedidelių gabaritų detales (pvz. gražtus).
- Greitesnis nei kiti plieno paviršiaus kietinimo procesai.
- Galima kombinuoti kartu su kitais paviršiaus kietinimo procesais ir pasiekti dar geresnius rezultatus.
- Paviršių galima ne tik sukietinti ir sumažinti dilimo koeficientą, bet ir suteikti kitas savybes, tokias kaip atsparumą korozijai.

Trūkumai:

- PVD dangos sluoksnio storis būna labai nedidelis, dažniausiai, kelių mikronų storio.
- Sudėtingas procesas, kuris reikalauja aukštos kvalifikacijos specialistų.
- Brangi įranga.

1.4. Lazerinis paviršiaus apdirbimas (modifikavimas)

Lazerinis paviršiaus modifikavimas (angl. *laser surface modification* (LSM)) gali būti apibūdinamas kaip bet koks medžiagos apdirbimas lazeriu, kai pakeičiama viena ar daugiau medžiagos paviršiaus savybių, be arba su legiruojamaisiais elementais. Lazeriniai paviršiaus apdirbimo procesai pasitelkiami tam, kad būtų pasiekti norimi konkretūs fizikiniai arba cheminiai medžiagos paviršiaus parametrai, pakitusi medžiagos paviršiaus cheminė sudėtis arba medžiagos paviršiaus mikrostruktūra (Lawrence, 2008).

1.4.1. Lazerinio paviršiaus apdirbimo (modifikavimo) metodų klasifikavimas

Išskiriamos kelios lazerinio paviršiaus modifikavimo technologijos, tokios kaip lazerinis legiravimas, sukietinimas, dengimas, kuris gali būti kaip plakiravimas ar fizikinis garų nusodinimas panaudojant lazerio energiją, ženklinimas, tekstūravimas, balansavimas. Šios lazerinio paviršiaus modifikavimo technologijos labai plačiai naudojamos gerinant medžiagų mechanines, fizikines, tribologines savybes ir atsparumą korozijai (Adesina, Papoola ir Fatoba, 2015).

Galimybėms ir taikymo sritims tinkamai nustatyti lazerinis apdirbimas klasifikuojamas pagal energinius ir technologinius požymius. Klasifikuojant energiniu požiūriu svarbiausi parametrai yra galios tankis arba intensyvumas ir generuojamo impulso trukmė (Balachinaitė et al., 2008).

Atsižvelgiant į spinduliuotės galios tankį, medžiagoje vyksta skirtingi procesai. Balachinaitės et al., knygoje „Lazerinės technologijos“ pateikiama lazerinio apdirbimo metodų grupavimo pagal energinius požymius diagrama (1.7 pav.).

Šioje diagramoje išskiriamos 4 zonos: paviršinio įkaitinimo, lydymo, medžiagos pašalinimo (išgarinimo), plazmos susidarymo.

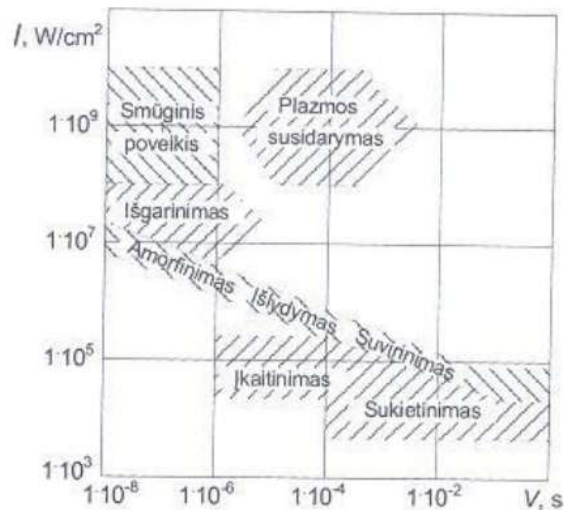
Paviršinio įkaitinimo zonoje medžiaga labai įkaista, jos paviršiniame sluoksnyje vyksta struktūriniai pokyčiai. Šioje zonoje galima grūdinti, atleisti ar kitaip termiškai apdirbti paviršius.

Kai lazerinio apdirbimo režimo parametrai patenka į lydymo zoną, metalą galima virinti, aplydyti, pjauti, legiruoti jo paviršių.

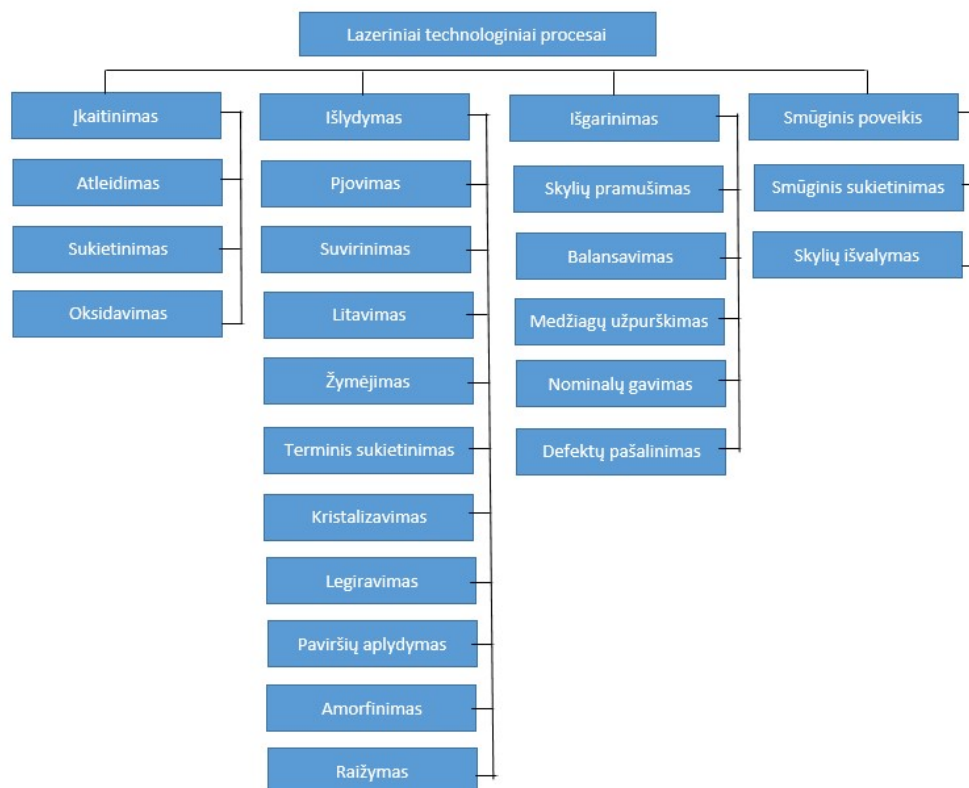
Medžiagos pašalinimo zonoje, kai galios tankis $I = 10^7 - 10^8 \text{ W/cm}^2$, o impulso ar spinduliuotės trukmė $\tau = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ s}$, medžiaga yra šalinama išgarinant, galima atlikti tokius procesus kaip pjovimas, skylių pramušimas, žymėjimas, balansavimas.

Dar labiau didėjant galios tankiui, garavimas intensyvėja, dėl to gali susidaryti plazma, medžiagoje atsirasti akustinės bangos, galimas smūginis poveikis medžiagai (Balachinaitė et al., 2008).

Visus technologinius procesus pagal išskirtas 4 zonas galima sugrupuoti taip, kaip parodyta 1.8 pav.



1.7 pav. Lazerinio paviršiaus apdirbimo metodų grupavimo pagal energinius požymius diagrama (Balachinaitė et al., 2008)



1.8 pav. Lazerinių technologinių procesų grupavimo schema (Balachinaitė et al., 2008)

1.4.2. Lazerinis paviršiaus legiravimas

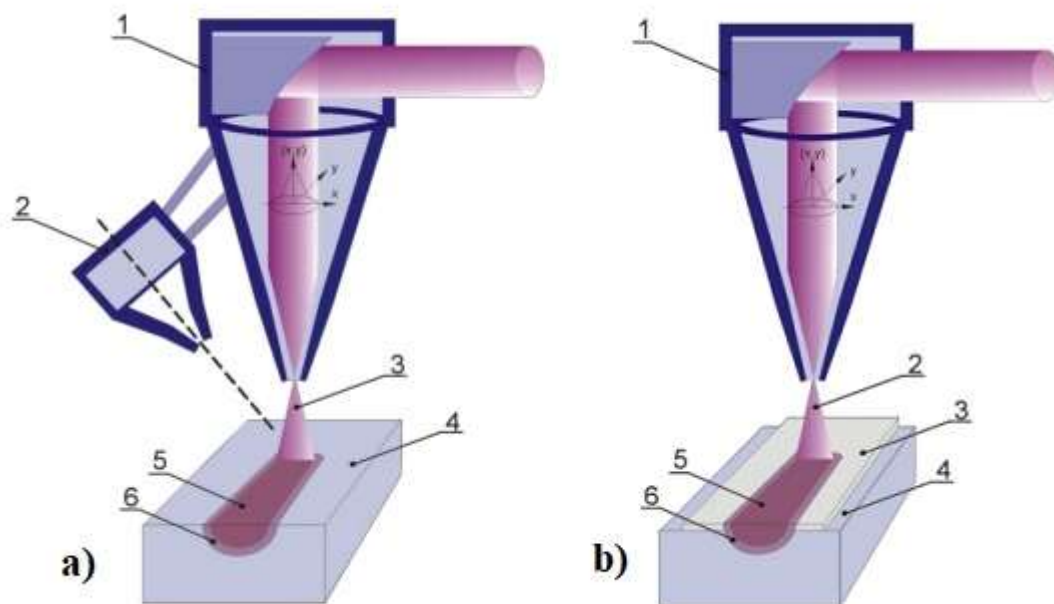
Lazerinis paviršiaus legiravimas (LSA) yra vienas iš svarbiausių metodų, taikomų pagerinti inžinerinių medžiagų paviršinėms savybėms, tokioms kaip kietumas, atsparumas dilimui, atsparumas kontaktiniam nuovargiui ir kitoms paviršių irimo problemoms (Hussain, Akhter, Farooq ir Aslam, 2010).

LSA yra papildomų legiruojamųjų elementų įkorporavimas į medžiagos paviršių didelės galios lazerio spinduliu, kai išlydomi pagrindinės medžiagos paviršiniai sluoksniai ir ant jų esanti danga (pasta). Šitokiu būdu labai greitai įvyksta medžiagos paviršinių sluoksnių ir legiruojamųjų elementų dangos išsilydymas, medžiagų susimaišymas ir ataušimas, suformuojant naują paviršinį sluoksnį, kurio cheminė sudėtis ir mikrostruktūra yra pakitusi (Adesina et al., 2015).

Tai nesudėtingas ir universalus būdas, taikomas naujiems aukštos kokybės lydiniams su išskirtinėmis paviršinėmis savybėmis formuoti. Procesas naudojamas sukurti lydiniams su kontroliuojama chemine sudėtimi, mikrostruktūra, legiruotojo sluoksnio gyliu, smulkiais grūdelių dydžiais, kad šios savybės atitiktų keliamus inžinerinius reikalavimus (Hussain et al., 2010).

Taikant LSA technologiją taip pat galima sumažinti brangių elementų, tokių kaip Ni, Cr, Co, Mo, W, Ti ir t.t. suvartojimą, nes detalė gali būti pagaminta iš pigesnės, lengvai mechaniškai apdirbamos medžiagos (substrato), o brangūs ir deficitiniai komponentai įterpiami gaminio paviršiniuose sluoksniuose (Hussain et al., 2010).

Legiravimo lazeriu procesas yra nesudėtingas ir spartus. Detalės paviršius padengiamas legiruojamuoju elementu (molibdeno, volframo karbido, titano karbido, titano nitrido, chromo, nikelio, boro ar kitų miltelių sluoksniu). Naudojant įvairius rišiklius iš legiravimo elementų miltelių daromos pastos. Paveiktas didelės galios lazerio pluošto, legiruojamųjų elementų sluoksnis ir paviršiaus metalas išsilydo ir susimaišo. Susidaro naujo lydinio sluoksnis, tvirtai sujungtas su pagrindinio metalo mase. Šio sluoksnio mikrostruktūra ir gylis iš esmės priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo, poveikio trukmės ir yra nuo 0,05 iki 2 mm (Balachinaitė et al., 2008). Tipinės legiravimo lazeriu schemas vaizduojamos 1.9 pav.



1.9 pav. Legiravimo lazerio spinduliuote schema: a) legiravimo milteliai įpurškiami lydymo metu; b) naudojama pasta su legiruojamaisiais priedais (Kusinski et al., 2012):

- a) 1 – lazerio fokusavimo sistema; 2 – legiruojamųjų miltelių tiekimas; 3 – lazerio spindulys; 4 – judantis ruošinys (substratas); 5 – legiruota zona; 6 – terminio poveikio zona.
- b) 1 – lazerio fokusavimo sistema; 2 – lazerio spindulys; 3 – legiruojamųjų elementų pasta; 4 – judantis ruošinys (substratas); 5 – legiruota zona; 6 – terminio poveikio zona.

Pavaizduotoje 1.9 pav. a) schemoje legiruojamųjų elementų milteliai užpurškiami ant metalo paviršiaus pro specialius antgalius norima kryptimi ir išlydomi kartu su detalės paviršiniu sluoksniu. Taip pat miltelių dalelės gali būti įpurškiamos į išlydymo vonelę po lazerio spinduliu.

Erdvė, kurioje vyksta medžiagos paviršiaus ir legiruojamosios medžiagos miltelių išlydimas lazeriu vadinama lazerio operacijos tūriu (angl. *laser operation volume* (LOV)). Pakankamo legiruojamųjų elementų dalelių kiekio buvimas, kurių dydis $d_p \gg \lambda_L$ (čia λ_L yra lazerio spindulio bangos ilgis), daro įtaką faktinėms šilumos šaltinio charakteristikoms, tokioms kaip naudjingoji (efektyvioji) galia ir erdviniam energijos pasiskirstymui (Bamberger et al., 1998).

1.4.3. Legiravimo priedai

Visus lazeriniam paviršiaus legiravimo procesui atlikti naudojamus legiruojamuosius priedus galima suskirstyti į tris grupes:

- *Nemetalinės medžiagos.* Lazerinis nemetalinių medžiagų (C, N, B, Si) legiravimas yra žinomų tradicinių metodų – cementavimo, azotinimo, borinimo ir kt. alternatyva. Legiruojant anglimi mažaanglį plieną, galima gauti smulkiagrūdę struktūrą iš martensito ir liekamojo austenito. Tokios struktūros mikrokietumas yra apie 9000 MPa. Po lazerinio azotinimo plieno struktūroje nusistovi azotinis martensitas, liekamasis austenitas ir geležies nitridai. Lazeriniu būdu įterpiant į plieną boro, jo struktūroje daugėja boridų (FeB , Fe_2B , Fe_3B), nėra liekamojo austenito, o mikrokietumas padidėja iki $(12 - 21) \cdot 10^3$ MPa. Tokie paviršiai yra atsparūs abrazyviniam dilimui. Prisotinus metalus siliciu, lazerio poveikio zonoje susidaro silicidai Fe_3Si , Fe_2Si_3 , FeSi , FeSi_2 , mikrokietumas padidėja iki $(14 - 15) \cdot 10^3$ MPa, taip pat labai padidėja atsparumas dilimui, korozijai, aukštos temperatūros aplinkos poveikiui (Balachinaitė et al., 2008).
- *Metalai ir jų lydiniai.* Legiruojant gryniaisiais metalais (Co, Cr, Ni, Mn, Mo, W, Ti, V), tarp jų ir lydomaisiais, susidaro persotinti kietieji tirpalai ir intermetalidai. Pavyzdžiui, legiruojant chromu plieną Y10, gaunamas iki 1mm storio legiruotas sluoksniu. Tai labai padidina atsparumą korozijai. Labai perspektyvus yra spalvotųjų metalų lazerinis legiravimas. Pavyzdžiui, legiruojant nikeliu aliuminio lydinius Al14 arba Al30, gaunami intermetalidai ir legiravimo elementų α – kietasis tirpalas. Legiruoto sluoksnio mikrokietumas padidėja iki $(2 - 3) \cdot 10^3$ MPa, o intermetalidų – iki $(8 - 10) \cdot 10^3$ MPa (Balachinaitė et al., 2008).

- *Karbidai*. Jei medžiagoje yra karbidų, labai padidėja kietumas ir atsparumas dilimui. Siekiant šių tikslų, metalai legiruojami labai nelydžių metalų karbidais (TiC, VC, TaC, WC) (Balachinaitė et al., 2008).

Kad lazeriu legiruotas paviršius būtų lygus ir glotnus, reikia atlikti baigiamąją apdirbimo operaciją, pavyzdžiui, paviršių nušlifuoti. Kol kas dėl technologinio proceso ypatumų legiravimas lazeriu dar nėra plačiai naudojamas, nes reikia parinkti tikslius energinius parametrus ir režimus, juos optimatizuoti kiekvienam legiruojamajam elementui arba kelių legiruojamųjų elementų mišiniui ir pagrindiniam metalui. Šie klausimai dar nagrinėjami, legiravimo technologijos dar tobulinamos mokslinėse laboratorijose (Balachinaitė et al., 2008).

1.4.4. Parinkti SLM gaminio paviršiaus modifikavimo procesui naudojami legiruojamieji priedai

Lazeriniu paviršiaus legiravimu tiriamajame darbe siekiama padidinti martensitinio sendinamo plieno SLM technologija pagamintų bandinių paviršines savybes, tokias kaip kietumą ir atsparumą dilimui. Šiuo tikslu, parinkti tokie legiruojamieji priedai, kurie pasižymi labai dideliu kietumu ir aukšta lydymosi temperatūra, kad būtų pasiektas žymus paviršiaus sukietinimo efektas.

Parinkti legiruojamieji priedai:

- B_4C – boro karbidas. Dėl labai didelio kietumo (apie 30 GPa), aukštos lydymosi temperatūros (2427 °C) ir mažo tankio (2.52 g/cm³) boro karbido pagrindu pagaminta keramika naudojama neperšaunamiems gaminiams gaminti (Sokeng et al., 2015). Apie 30 GPa kietumo boro karbidas šiuo rodikliu nusileidžia tik deimantui ir kubinę gardelę turinčiam „cubic-BN“ (boro nitridui), tačiau yra pigesnis ir lengviau paruošiamas (Grasso et al., 2011).
- Co_3B – kobalto boridas. Dėl ypatingo kietumo (30-60 GPa) metalo-B lydiniai gali būti naudojami kaip apsauginės dangos. Meksikos miesto Pueblos universiteto mokslininkai atliko Co – B lydinių dangų tyrimus, ir nustatė, kad amorfinių Co–B dangų, tarp kurių yra ir Co_3B , kietumo vertės svyruoja nuo 700 iki 820 HV, priklausomai nuo boro koncentracijos dangoje. Didžiausias nustatytas kietumas – 1280 HV, o mažiausias trinties koeficientas – 0,08 (Martinez-Hernández et al., 2018).

Žinyuose randama Co_3B lydymosi temperatūra yra 1125 °C (Perry, 2011).

- TiC – titano karbidas. Titano karbidas yra vienas kietiausių ir stabiliausių karbidų, todėl jis laikomas efektyviu ir naudingu priedu siekiant sustiprinti atsparumo dilimui sąlygas. Osakos pramonės ir technologijų instituto mokslininkai tirdami lazerinio legiravimo procesą ant austenitinio nerūdijančio plieno 304 paviršiaus formuojant TiC kietosios dangos sluoksnį nustatė, kad lazeriu legiruotos zonos kietumo vertės siekė nuo 800 HV iki 1200 HV, lyginant su substrato kietumu, kuris siekė apie 200 HV (Yamaguchi, Hagino, 2018).

Žiniuose randama TiC lydymosi temperatūra yra 3065 °C, kietumas – 93 HRC, o mikrokietumas 3200 HV (Bauccio, 1994).

- TaSi₂ – tantalio silicidas. Pereinamosios grupės metalų silicidai pasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis, dideliu stiprumu, aukštomis lydymosi temperatūromis, dideliu atsparumu šliaužimui, t.y. polinkiui deformuotis ilgą laiką veikiant dideliems įtempiams aukštoje temperatūroje, taip pat geru atsparumu oksidacijai. Toks savybių derinys paskutiniu metu pritraukė daugelio mokslininkų dėmesį. Tantalio silicidas yra daug potencialo turinti aukštatemperatūrė ir mikroelektroninė medžiaga (Chen et al., 2019).

Tantalio disilicido lydymosi temperatūra yra 2200 °C, tūrinis tankis 9,14 g/cm³, o kietumas yra 15,6 GPa, taip pat tantalio disilicidas laidus elektros srovei (Sciti, Silvestroni, Celotti, Melandri ir Guicciardi, 2008).

2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA

2.1. Tiriamojo objekto (SLM bandinių) gamyba

Tiriamojo objekto gamybai panaudoti 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno miteliai, kurių cheminė sudėtis nurodyta 1.1 lentelėje. Plačiau tiriamojo objekto medžiaga, jos fizikinės, mechaninės bei kitos savybės aprašomos 1.2.1 skyriuje.

Tiriamiesiems bandiniams pagaminti buvo panaudotas *Concept Laser M3* selektyviojo lazerinio sulydymo įrenginys (2.1 pav.).



2.1 pav. *Concept Laser M3* selektyviojo lazerinio sulydymo įrenginys

Bandinių sulydymo metu pagrindinių įrenginio technologinių parametrų keitimas yra neįmanomas dėl gamintojo nustatytų apribojimų, siekiant užtikrinti įrenginio našumą bei gaminamos produkcijos kokybę.

Technologiniai selektyviojo lazerinio sulydymo parametrai pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Technologiniai SLM proceso parametrai

Lazerio			Sluoksnio storis, mm	Sulydymo greitis, mm/s	Apsauginių dujų	
Bangos ilgis, nm	Galia, W	Dėmės dydis, mm			Tipas	Debitas, l/h
1064	100	Ø 0,2	0,03	0,2	Argonas (Ar)	0,75

Sulydytam tūriui atskirti nuo substrato buvo panaudotos vielinės elektroerozijos staklės *Charmille cut 200*. Nuo substrato atskirti bandiniai nuvalyti ultragarso vonelėje. Vonelės tūriui užpildyti panaudotas C_3H_6O tirpalas. Valymo trukmė – 15 min. Valymo terpės temperatūra 40 °C.

Tyrimo metu pagaminti 1.2709 markės plieno pagrindo milteliais sulydyti stačiakampės formos bandiniai, kurių ilgis – 15 mm; plotis – 15 mm; storis – 10 mm.

2.2. Impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumo tyrimas skaitiniu modeliavimu baigtinių elementų metodu

Iš pradžių tiriamajame darbe buvo manoma LSA procesą atlikti impulsiniu nanosekundiniu lazeriu. Šitokio lazerinio įrenginio taikymo efektyvumui įvertinti atliktas skaitinis modeliavimas baigtinių elementų metodu, naudojant modeliavimo programinę įrangą „ANSYS. Mechanical APDL“.

Skaitinio modeliavimo tyrimo metu sukurto modelio verifikavimas atliktas remiantis 2021 m. apginto K. Laboko magistro darbo „Metalinių paviršių apdorojimas koncentruotos energijos šaltiniais“ eksperimentinių tyrimų rezultatais, kai 1.4301 markės nerūdijančio plieno plokštelė buvo apdorota impulsiniu nanosekundiniu lazeriu EKSPLA „Baltic HP 1064“.

Pagrindinis šio tyrimų etapo tikslas – įvertinti kokio gylio 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno perlydytą paviršiaus sluoksnį galima pasiekti taikant apdorojimą impulsiniu nanosekundinės veikos lazeriu. Modeliuotas lazerinio paviršiaus modifikavimo procesas, įvertinamas šilumos ir temperatūrų pasiskirstymas bandinio modelyje.

2.2.1. Sukurto tiriamojo modelio verifikavimui atlikti naudotos plokštelės medžiaga, matmenys ir parametrai

Lazerinio paviršiaus apdirbimo technologijai tirti eksperimentiniu būdu buvo naudota 1.4301 markės nerūdijančio plieno plokštelė, kurios matmenys 50 x 50 x 1 mm.

Šios markės plienas yra austenitinės chrom-nikelinės klasės plienas, cheminė sudėtis, pagrindinės fizikinės ir cheminės savybės bei ekvivalentai kituose standartuose pateikti 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 lentelėse.

2.2 lentelė. 1.4301 markės plieno cheminė sudėtis

Elementas	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	C	P	S
Kiekis, %	Likęs	17.5–19.5	8–10.5	≤ 2	≤ 1	≤ 0.11	≤ 0.07	≤ 0.045	≤ 0.015

2.3 lentelė. 1.4301 markės plieno ekvivalentai įvairiuose standartuose

ASTM/AISI	EN/DIN		UNS	BS	AFNOR	ГОСТ
304	1.4301	X5CrNi18-10	S30400	304S50	Z3CN18.09	08Ch18N10

2.4 lentelė. Pagrindinės 1.4301 markės plieno mechaninės savybės

Stiprio riba MPa	Sąlyginė (0,2%) takumo riba, MPa	Santykinis pailgėjimas, % per 50mm	Kietumas	
			Rockvelio skalėje, HR B (max)	Brinelio skalėje, HB (max)
500-700	≥ 190	≥ 45	92	≤ 225

2.5 lentelė. Pagrindinės 1.4301 markės plieno fizikinės savybės

Tankis (kg/m^3)	Tamprumo Modulis (GPa)	Vidutinis šiluminio plėtimosi koeficientas ($\mu m/m/^\circ C$)			Šilumos laidumas ($W/m \cdot K$)	Savitoji šiluminė talpa ($J/kg \cdot K$)	Elektrinė varža ($n\Omega \cdot m$)
		20-100°C	20-300°C	20-500°C	100°C		
7900	200	16.0	17.0	18.0	15	500	720

Šios klasės plienai pasižymi labai dideliu atsparumu korozijai, taip pat yra termiškai negrūdinami, o po atleidimo yra nemagnetiniai (prieš atleidimą pasižymi labai silpnomis magnetinėmis savybėmis). 1.4301 markės plienas yra vienas iš labiausiai pasaulyje paplitusių nerūdijančių plienų, pasižymintis geru atsparumu korozijai, lengvu apdirbamumu, patvarumu, suvirinamumu, taip pat pasižymintis estetinė išvaizda, jei paviršius būna nupoliruotas, nušlifuotas.

2.2.2. Eksperimentui atlikti naudota lazerinė įranga

Lazerinis 1.4301 markės plieno plokštelės paviršiaus apdorojimas atliktas nanosekundiniu lazeriu EKSPLA „Baltic HP 1064“ (2.2 pav.). Šio lazerinio įrenginio duomenys ir parametrai pateikti 2.6 lentelėje remiantis gamintojo „Altos Photonics“ pateikiama specifikacija.



2.2 pav. Nanosekundinis lazeris Ekspla „Baltic HP 1064“

2.6 lentelė. Lazerio EKSPLA „Baltic HP 1064“ specifikacija

Lazerio EKSPLA „Baltic HP 1064“ parametras	Parametro vertė/pavadinimas
Lazerinės matricos medžiaga	Itrio vanadatas YVO_4
Aktyvatoriaus medžiaga	Nd
Spinduliuotės bangos ilgis λ	1064 nm
Vidutinė galia P	20 W
Impulsų pasikartojimo dažnis ν	5–100 kHz
Impulso trukmė τ	10 ns
Pulsavimo (Pulse-to-pulse) stabilumas (RMS)	<1 %
Fokusuojantis lęšis	160 mm Rodenstock F-theta-ronar
Lazerio dėmelės spindulys sąsmaukoje (išfokusavimas 0 mm)	18,7 μm
Aušinimas	Oras

2.2.3. Lazerinio paviršiaus modifikavimo parametrai

Eksperimentais gautų rezultatų ir kompiuterinio modeliavimo metu gautų rezultatų palyginimui pasirinktos nuotraukos (2.3 ir 2.4 pav.) ir duomenys, gauti eksperimentą atlikus su lazerinio apdorojimo režimo parametrais nurodytais 2.7 lentelėje. Šiais parametrais atlikus 1.4301 markės plieno plokštelės paviršiaus lazerinį modifikavimą, gauti patenkinami ir gerai įvertinami duomenys, kuriuos nesudėtinga palyginti su kompiuterinio modeliavimo metu gautais duomenimis.

2.7 lentelė. Lazerinio plokštelės paviršiaus modifikavimo technologijos režimo parametrai

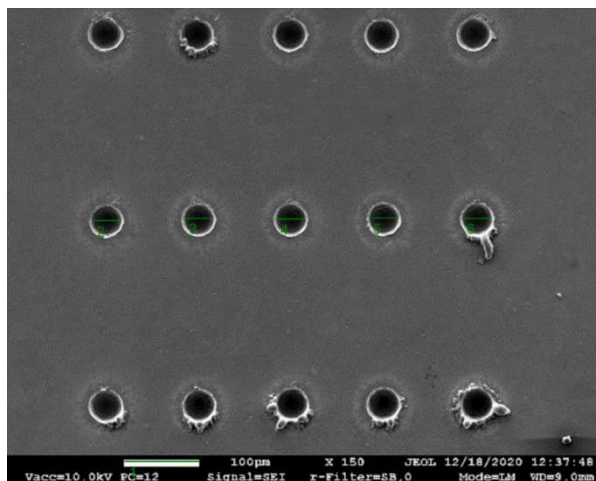
Parametras	Reikšmė
Impulso trukmė	10 ns
Impulsų skaičius	50
Vidutinė galia	10,85 W
Impulso energija	108,5 μJ
Energijos tankis	19,8 J/cm^2

2.3 pav. matoma šiuo režimu apdorotos plokštelės paviršiaus nuotrauka, o 2.4 pav. matoma šiuo režimu apdorotos plokštelės skersinio pjūvio nuotrauka. Plokštelės paviršiaus nuotrauka gauta atliekant skenuojamosios elektroninės mikroskopijos tyrimą prietaisu SEM JEOL JSM-7600F, o plokštelės skersinio pjūvio nuotrauka gauta optiniu mikroskopu.

2.2.4. Eksperimentinių tyrimų metu gautų duomenų apdorojimas

Eksperimentinių tyrimų metu ir kompiuterinio modeliavimo metu gautiems rezultatams palyginti atlikti lazeriu suformuotų taškų geometrinių parametrų matavimai (gylis ir skersmens). Matavimai atlikti, naudojant programinę įrangą „Optika Vision Lite 2.1“. Tiriant lazeriu apdoroto paviršiaus nuotrauką (2.3 pav.) išmatuoti lazeriu suformuotų taškų skersmens duomenys pateikti 2.8 lentelėje.

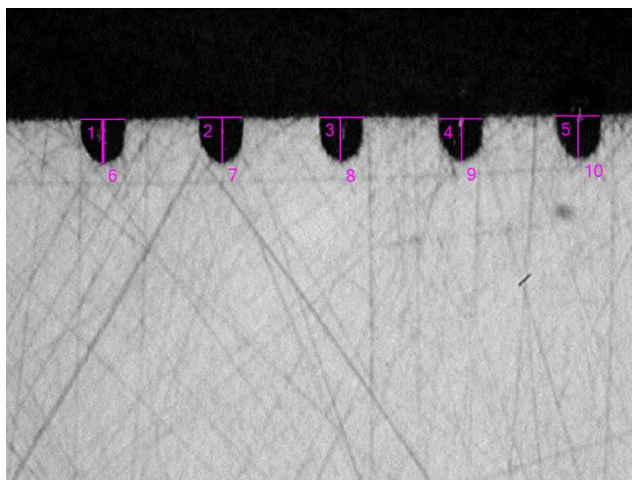
Pritaikius 2.8 lentelės duomenis, programinės įrangą „Optika Vision Lite 2.1“ sukalibruotas mastelis reikalingas lazeriu apdorotos plokštelės skersinio pjūvio geometriniams matavimams atlikti. Sukalibravus, atlikti skersinio pjūvio nuotraukos matavimai, išmatuotas duobučių skersmuo ir gylis. Rezultatai pateikti 2.9 lentelėje.



2.3 pav. 1.4301 markės plieno plokštelės paviršius po lazerinio modifikavimo proceso

2.8 lentelė. Lazeriu suformuotų taškų skersmens matavimai

Eil. Nr.	Skersmuo, μm	Vidurkis, μm
2	36,359	37,122
3	37,125	
4	37,125	
5	37,874	
6	37,125	



2.4 pav. 1.4301 markės plieno skersinio pjūvio nuotrauka po lazerinio modifikavimo proceso

2.9 lentelė. Lazериu suformuotų taškų matavimai skersinio pjūvio nuotraukoje

Eil. Nr.	Skersmuo, μm	Vidurkis, μm	Eil. Nr.	Gylis, μm	Vidurkis, μm
1	36,542	37,008	6	35,967	35,964
2	37,122		7	36,542	
3	37,707		8	37,702	
4	37,122		9	35,387	
5	36,547		10	34,22	

2.2.5. Šilumos mainų skaičiavimo baigtinių elementų metodika

Skaičiavimuose priimta, kad kaitinamas plokštelės išorinis paviršius.

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

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = Q, \quad (2.1)$$

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

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

čia: $\{q\}$ – šilumos srautas ploto vienetui; Q – šilumos šaltinis.

Ryšį tarp šilumos srauto ir temperatūros gradiento nusako Furjė dėsnis:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T, \quad (2.2)$$

čia: $[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$ – šilumos laidumo matrica;

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

Iš (2.2.5.1 ir 2.2.5.2) lygčių:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + Q, \quad (2.3)$$

Lygti (2.3) galima užrašyti taip:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.4)$$

Priimta, kad visi procesai vyksta Dekarto koordinatinių sistemose.

Priimamos tokios kraštinės sąlygos:

1. Temperatūra, proceso pradžioje veikianti elemento paviršiaus plotą:

$$T = T_0, \quad (2.5)$$

2. Suteikiamos šilumos srautas, veikiantis elemento paviršiaus plotą:

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q_0, \quad (2.6)$$

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

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

$$\{q\}^T \{\eta\} = -h_p (T_{ap} - T), \quad (2.7)$$

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

Įvertinus (2.2) lygtį, (2.6) ir (2.7) lygtys užrašomos taip:

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = q_0, \quad (2.8)$$

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = h_p (T_{ap} - T), \quad (2.9)$$

Panaudojant virtualiosios temperatūros kitimą, (2.4) lygties integravimui įvedamas elemento tūris V ir, naudojant (2.9) – (2.10) lygtis, atliekama (2.4) lygties transformacija

$$\begin{aligned} \int_V \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(V) = \\ = \int_S \delta T q_0 d(S) + \int_S \delta T h_p (T_{ap} - T) d(S) + \int_V \delta T \times Q d(V) \end{aligned} \quad (2.10)$$

čia: δT – leistina virtualioji temperatūra; V – elemento tūris.

Kintamoji temperatūra T priklauso nuo erdvinės padėties ir laiko funkcijos:

$$T = \{N\}^T \{T_e\}, \quad (2.11)$$

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:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \left\{ \dot{T}_e \right\}, \quad (2.12)$$

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

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\}, \quad (2.13)$$

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

$$\{L\}T = [B]\{T_e\}, \quad (2.14)$$

$$\text{čia: } [B] = \{L\}\{N\}^T, \quad (2.15)$$

Įvertinus (2.14) – (2.15) formules, (2.10) lygties variacinė forma gali būti supaprastinta:

$$\begin{aligned} & \int_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{N\}^T \left\{ \dot{T}_e \right\} d(V) + \int_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{v\}^T [B] \{T_e\} d(V) + \\ & + \int_V \{\delta T_e\}^T \{B\}^T [D][B] \{T_e\} d(V) = \int_S \{\delta T_e\}^T \{N\} q_0 d(S) + \\ & + \int_S \{\delta T_e\}^T \{N\} h_p (T_{ap} - \{N\}^T \{T_e\}) d(S) + \int_V \{\delta T_e\}^T \{N\} Q d(V) \end{aligned} \quad (2.2.5.16)$$

Priimama, kad elemento medžiagos tankis ρ yra pastovus, o medžiagos šiluminė talpa c ir šilumos šaltinis Q gali keistis. Dydziai $\{T_e\}$, $\left\{ \dot{T}_e \right\}$ ir $\{\delta T_e\}$ yra elemento mazgų temperatūra ir kartu pastovieji elemento tūrio dydziai. Todėl integrale jie gali būti panaikinti. Kadangi visos (2.16) lygties dalys yra padaugintos iš vektoriaus $\{\delta T_e\}$, šis vektorius paskutinėje lygtyje yra panaikinamas. (2.16) lygtį galima perrašyti taip:

$$\begin{aligned} & \rho \int_V c \{N\} \{N\}^T d(V) \left\{ \dot{T}_e \right\} + \rho \int_V c \{N\} \{v\}^T d(V) \{T_e\} + \\ & + \int_V [B]^T [D][B] d(V) \{T_e\} = \int_S \{N\} q_0 d(S) + \int_S T_{ap} h_p \{N\} d(S) - \\ & - \int_S h_p \{N\} \{N\}^T \{T_e\} d(S) + \int_V Q \{N\} d(V) \end{aligned} \quad (2.17)$$

(2.14) lygtį galima supaprastinti taip:

$$[C_e^t] \left\{ \dot{T}_e \right\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]) \{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\}, \quad (2.18)$$

Čia:

$$[C_e^t] = \int_V \rho c_p(T) \{N\} \{N\}^T dV; \quad (2.19)$$

$$[K_e^{tm}] = \int_V [B]^T [D] [B] \{T_e\} dV; \quad (2.20)$$

$$[K_e^{tb}] = \int_S \{N\} [K'] \{N\}^T dS; \quad (2.21)$$

$$[K_e^{tc}] = \int_S h(T) \{N\} \{N\}^T dS; \quad (2.22)$$

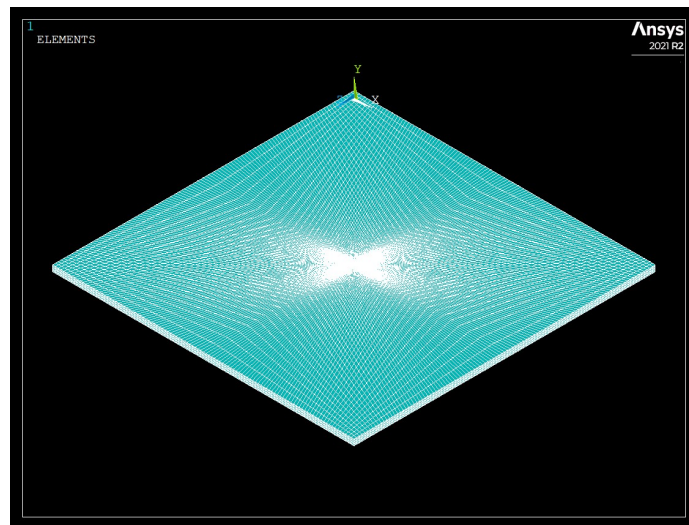
$$\{Q_e^f\} = \int_S \{N\} q_0 dS, \quad (2.23)$$

$$\{Q_e^c\} = \int_S h(T) \{N\}^T \{N\} T_0 dS, \quad (2.24)$$

$$\{Q_e^g\} = [C_e^t] T_o. \quad (2.25)$$

2.2.6. Skaitinis modeliavimas

Atliekant skaitinį modeliavimą, programinės įrangos paketu „ANSYS. Mechanical APDL“ sukurtas erdvinis tiriamosios 1.4301 markės plieno plokštelės konstrukcinis modelis, kuris sudalytas į 8 mazgų „Brick & Node 278“ baigtinius elementus. Iš viso tiriamasis objektas sudalytas į 110 000 baigtinių elementų. Konstrukcinis erdvinis į BE sudalytas modelis pateiktas 2.5 pav.

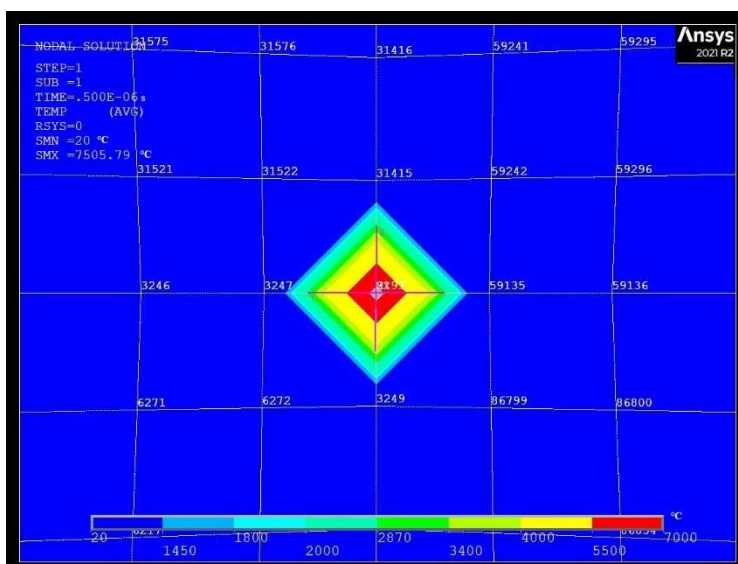


2.5 pav. Plokštelės modelis, suskaidytas į baigtinius elementus

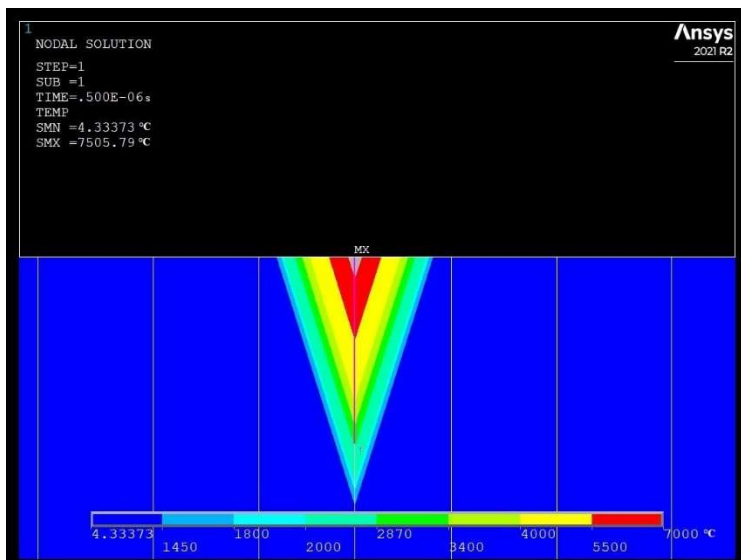
Tiriamajam modeliui priskirtos 1.4301 markės plieno savybės ir 2.7 lentelėje nurodytos lazerinio paviršiaus apdirbimo sąlygos, poto atlikti šiluminių mainų skaičiavimai.

2.2.7. Skaitinio modeliavimo BE metodu rezultatai

Atlikus skaitinio modeliavimo šiluminių mainų skaičiavimus baigtinių elementų metodu gauti temperatūrinio pasiskirstymo, šiluminio gradiento pasiskirstymo ir šiluminio srauto pasiskirstymo bandinio modelyje rezultatai. Eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo metu gautų rezultatų palyginimui svarbiausi yra temperatūrinio pasiskirstymo grafikai, pateikti 2.6 ir 2.7 pav.



2.6 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo plokštelės paviršiuje grafikas. Vaizdas iš viršaus



2.7 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo plokštelės centro gilyje grafikas. Vaizdas plokštelės pjūvio per centrą

Gauti temperatūrinio pasiskirstymo grafikai apdoroti „Optika Vision Lite 2.1“ programine įranga. Grafikuose matuota lazerio šiluminio srauto paveikta zona, kuri įkrito iki 1.4301 plieno garavimo temperatūros. Atlikti šios zonos gylio ir pločio matavimai, rezultatai pateikti 2.10 lentelėje, matavimų rezultatai palyginti su eksperimentinių tyrimų metu gautais išgarintos zonos rezultatais.

2.10 lentelė. Lazериu išgarintos zonos geometrinių parametrų matavimų rezultatai gauti skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų metu

Eksperimentų metu nustatyti rezultatai		Skersmuo [μm]		Santykinė paklaida
Parametras	Vid. reikšmė, μm	Parametras	Vid. reikšmė, μm	
Išgarintos zonos skersmuo [$\varnothing_{E_{ksp}}$]	37,122	Išgarintos zonos skersmuo [$\varnothing_{Ansys}$]	33,9	9,3 %
Išgarintos zonos gylis [$h_{E_{ksp}}$]	35,964	Išgarintos zonos gylis [h_{Ansys}]	34,32	4,57 %

Skaitinio modeliavimo BE metodu metu nustatyti lazериu modifikuotos zonos geometriniai parametrai yra artimi eksperimentinių tyrimų metu gautiems rezultatams, santykinė išgarintos zonos skersmens paklaida – 9,3 %, o išgarintos zonos gylio – 4,57 %. Pagal gautus rezultatus, galima daryti prielaidą, kad skaitinio modeliavimo metu sukurtas modelis yra verifikuotas ir tikslinga jį naudoti tolimesniam impulsinės nanosekundinės veikos lazerio efektyvumo įvertinimui apdorojant 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno paviršių.

2.2.8. Skaitinio modeliavimo BE metodu taikant impulsinio nanosekundinio lazerio apdorojimą martensitinio sendinamo plieno modelio paviršiui tyrimas

Verifikavus skaitinio modeliavimo metu sukurtą bandinio modelį ir siekiant įvertinti impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumą 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno paviršių apdorojimui, tiriamajam modeliui priskirtos fizikinės ir mechaninės 1.2709 markės plieno savybės, nurodytos 2.11 lentelėje.

2.11 lentelė. Fizikinės ir mechaninės martensitinio sendinamo plieno 1.2709 (DIN) savybės, naudotos skaitiniam modeliavimui atlikti

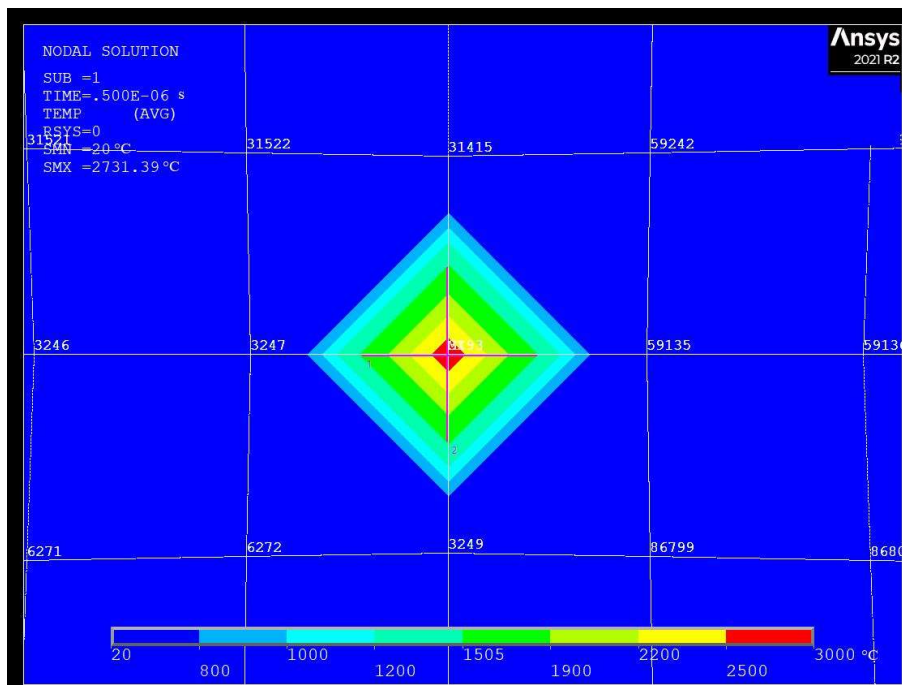
Savybė	Vertė
Tankis δ , kg/m ³	8000–8100 (8050)
Šiluminis laidumas K, W/mK	kai temp. 20 °C – 14,2 kai temp. 500 °C – 19,0 kai temp. 600 °C – 21,0 kai temp. 1300 °C – 28,6
Savitoji šiluminė talpa C	450 J/kg· °C
Linijinio plėtimosi koeficientas α , K ⁻¹	10–11 · 10 ⁻⁶ m/K (10,5 · 10 ⁻⁶)
Puasono koef., ν	0,27–0,3 (0,285)
Tamprumo modulis E, GPa	Horizontalia (XY) kryptimi: 150–170 (160) Vertikalia (Z) kryptimi: 140–160 (150)
Takumo riba σ , MPa	Horizontalia (XY) kryptimi: 1000–1100 (1050) Vertikalia (Z) kryptimi: 900–1100 (1000)

Įvertinimui atlikti yra svarbu parinkti tokį lazerinio paviršiaus modifikavimo režimą, kurio metu plieno medžiaga nebūtų išgarinama, o tik perlydoma, t.y. proceso metu pasiekta maksimali medžiagos paviršiaus temperatūra neturi viršyti medžiagos garavimo taško temperatūros. Naudingiausias lazerinio paviršiaus modifikavimo režimas neišgarinant medžiagos pateiktas 2.12 lentelėje.

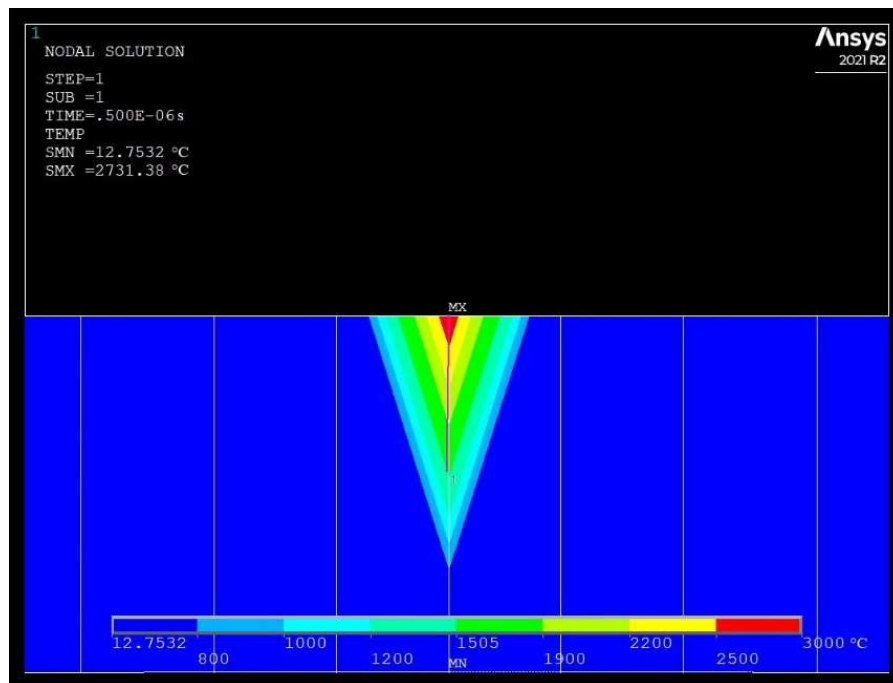
2.12 lentelė. Lazerinio plokštelės paviršiaus modifikavimo technologijos režimo parametrai, kai medžiaga nėra išgarinama

Parametras	Reikšmė
Impulso trukmė	10 ns
Impulsų skaičius	25
Vidutinė galia	7,23 W
Impulso energija	72,3 μ · J
Energijos tankis	13,2 J/cm ²

Šiuo režimu atlikto skaitinio modeliavimo BE metodu temperatūrinio pasiskirstymo grafikai pateikti 2.8 ir 2.9 pav., proceso metu pasiekta maksimali temperatūra – 2731,38 °C. Temperatūrinio pasiskirstymo grafikai apdoroti „Optika Vision Lite 2.1“ programine įranga. Grafikuose matuota lazerio šiluminio srauto paveikta zona, kuri įkaijo virš 1.2709 markės plieno lydymosi temperatūros (1505 °C). Išmatuoti parametrai: perlydytos zonos skersmuo – 15,66 μ m; perlydytos zonos gylis – 24,7 μ m.



2.8 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo 1.2709 markės plieno modelio paviršiuje grafikas.
 Vaizdas iš viršaus



2.9 pav. Temperatūrinio pasiskirstymo 1.2709 markės plieno modelio gylyje grafikas. Vaizdas
 modelio pjūvio per centrą

2.2.9. Impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumo įvertinimo apibendrinimas

Remiantis apginto 2021 m. magistro darbo eksperimentiniais rezultatais, sukurtas modelis skaitinio modeliavimo tyrimui verifikuotas, nes nustatyti panašūs duomenys į eksperimentinių tyrimų metu nustatytus rezultatus, santykinė išgarintos zonos skersmens paklaida apytiksliai 9,3 %, o išgarintos zonos gylio paklaida – apytiksliai 4,57 %.

Remiantis šiuo modeliu atliktas 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno paviršiaus lazerinis modifikavimas ir nustatytas perlydytas sluoksnis, kurio skersmuo – 15,66 μm ; gylis – 24,7 μm .

Remiantis gautais duomenimis, tikslinga šį skaitinio modeliavimo metodą taikyti ir ateityje, siekiant įvertinti lazerinio šiluminio srauto poveikį įvairių bandinių paviršiams.

Atlikus impulsinio nanosekundinio lazerio taikymo efektyvumo vertinimą, nustatyta, kad lazeriu išlydomas paviršinis sluoksnis yra per plonas, nes lazeriu perlydytas sluoksnis yra plonesnis už įžotintą ir impulsinis lazeris nebus naudingas atlikti lazerinio legiravimo procesui, todėl tolimesniam magistrinio darbo tyrimui pasirinkta taikyti nuolatinės veikos lazerį.

2.3. Bandomasis lazerinis SLM bandinių paviršių apdorojimas nuolatinės veikos CO₂ lazeriu siekiant parinkti tinkamiausių lazerinio paviršiaus legiravimo parametrų diapazoną

Tyrimo metu, siekiant parinkti tinkamiausių lazerinio paviršiaus legiravimo parametrų diapazoną, atlikti bandomieji eksperimentiniai tyrimai, nuolatinės veikos CO₂ lazeriu apdorojant SLM technologija pagamintų bandinių paviršius.

2.3.1. Lazerinio paviršiaus modifikavimo be legiruojamųjų priedų režimai

Bandomiesiems eksperimentiniams tyrimams atlikti, naudotas nuolatinės veikos CO₂ lazeris, apdoroti šoniniai, mechaniškai neabdirbti SLM bandinių paviršiai, nenaudojant legiruojamųjų priedų. Lazeriu perlydyti takeliai bandinio paviršiuje suformuojami taip, kad būtų galima pamatuoti ir surinkti duomenis apie perlydyto sluoksnio gylį išilgai visos perlydytos siūlės. Šio bandomojo eksperimentinio tyrimo tikslas, nustatant vidutinį perlydyto sluoksnio gylį, parinkti

optimalius lazerinio apdorojimo parametrus, kurie bus taikomi kitame eksperimentinių tyrimų etape, atliekant lazerinį legiravimo procesą.

Atliekant lazerinį paviršiaus modifikavimą buvo naudojamos apsauginės argono dujos. Lazerinio apdorojimo metu buvo keičiami šie pagrindiniai lazerinio įrenginio parametrai:

- Lazerio spindulio galia P [W].
- Lazerio skenavimo greitis V [cm/min].
- Lazerio spindulio dėmės skersmuo bandinio paviršiuje d [mm].

Lazeriniam SLM technologija pagamintų bandinių paviršių apdorojimui be legiruojamųjų priedų naudoti techniniai režimų parametrai pateikti 2.14 lentelėje.

2.13 lentelė. Lazerinio paviršiaus modifikavimo be legiruojamųjų priedų režimų techniniai parametrai

Lazerinio paviršiaus modifikavimo režimo Nr.	Nuolatinės veikos CO ₂ lazerio techniniai parametrai		
	Galia, W	Lazerio spindulio dėmės skersmuo d , mm	Lazerio skenavimo greitis, cm/min
1.	100	2	40
2.	200	2	40
3.	300	2	30
4.	300	2	50
5.	300	2	60
6.	300	1,7	40
7.	400	1,7	40
8.	500	1,7	30
9.	500	1,7	40

2.3.2. Lazериu modifikuotų takelių be legiruojamųjų priedų tyrimas

Bandomųjų eksperimentinių tyrimų metu, nenaudojant legiruojamųjų priedų, lazериu apdorotų, SLM technologija pagamintų bandinių paviršiams tirti, buvo taikyti optinės mikroskopijos tyrimai.

Skirtingais režimais apdorotų SLM bandinių paviršių optinės mikroskopijos tyrimams atlikti naudotas mikroskopas „MBC 9“ su skaitmenine kamera „Optika“. Vidutinio lazериu perlydyto sluoksnio geometriniai tyrimai atlikti naudojant 4 kartų didinimo objektyvą.

Tyrimo metu buvo sufokusuoti lazeriu perlydytų takelių išilginių pjūvių vaizdai ir skaitmenine kamera padarytos jų nuotraukos. Gautos nuotraukos apdorotos ir išanalizuotos programinės įrangos paketu „Optika Vision Lite 2.1“.

Optinės mikroskopijos tyrimams atlikti buvo paruošti be legiruojamųjų priedų lazeriu modifikuotų bandinių paviršių mikrošlifai. Mikrošlifų paruošimo metodika išsamiai aprašyta tyrimų analizės metodikos, optinės mikroskopijos skiltyje 2.5.1.

2.3.3. Bandomųjų eksperimentinių tyrimų rezultatai ir apibendrinimas

Taikant optinės mikroskopijos tyrimo metodą, buvo atlikti bandomųjų eksperimentinių tyrimų metu be legiruojamųjų priedų lazeriu modifikuotų, t.y. perlydytų, takelių geometriniai tyrimai. Buvo atlikti įvairiais lazerinio apdorojimo režimais perlydytų sluoksnių gylio matavimai išilgai perlydytos siūlės ir apskaičiuoti vidutiniai skirtingais režimais perlydytų sluoksnių gyliai. Rezultatai pateikti 2.15 lentelėje.

2.14 lentelė. Bandomųjų eksperimentinių tyrimų rezultatai

Lazerinio paviršiaus modifikavimo režimo Nr.	Nuolatinės veikos CO ₂ lazerio techniniai parametrai			Vidutinis lazeriu perlydyto sluoksnio gylis, mm
	Galia P, W	Lazerio spindulio dėmės skersmuo d , mm	Lazerio skenavimo greitis, cm/min	
1.	100	2	40	0,07
2.	200	2	40	0,102
3.	300	2	30	0,149
4.	300	2	50	0,42*
5.	300	2	60	0,137
6.	300	1,7	40	0,37
7.	400	1,7	40	0,264
8.	500	1,7	30	0,613
9.	500	1,7	40	0,33

*matavimas gali būti netikslus dėl klaidos vykdant ėsdinimo procesą.

Tiriant be legiruojamųjų priedų lazeriu apdorotus bandinių paviršius, nustatyta, kad didelę įtaką geometriniam lazeriu formuojamų takelių matmenims (perlydymo gyliui) turi lazerio

spindulio galia. Didžiausi perlydyto sluoksnio gyliai, nuo 0,264 mm iki 0,613 mm, pasiekti paviršiuose, procesą atliekant lazerio spinduliu, kurio galia 400–500 W, lazerio dėmės skersmuo – 1,7 mm, o skenavimo greitis 30–40 cm/min.

Taip pat iš gautų rezultatų pastebėta, kad siaurinant lazerio spindulio dėmės skersmenį nuo 2 mm iki 1,7 mm, perlydyto sluoksnio gylis didėja. Atliekant procesą lėtesniu, 30 cm/min greičiu ir 2 mm lazerio skersmens dėme, gautas perlydyto sluoksnio gylis (0,139 mm) mažesnis už išlydymo gylį (0,37 mm), gautą procesą atliekant 40 cm/min greičiu ir 1,7 mm lazerio skersmens dėme. Tai vyksta nes lazeriu tiekiamą šiluminę energiją labiau sukoncentruojama ir pasiekiamas gilesnis išlydymas.

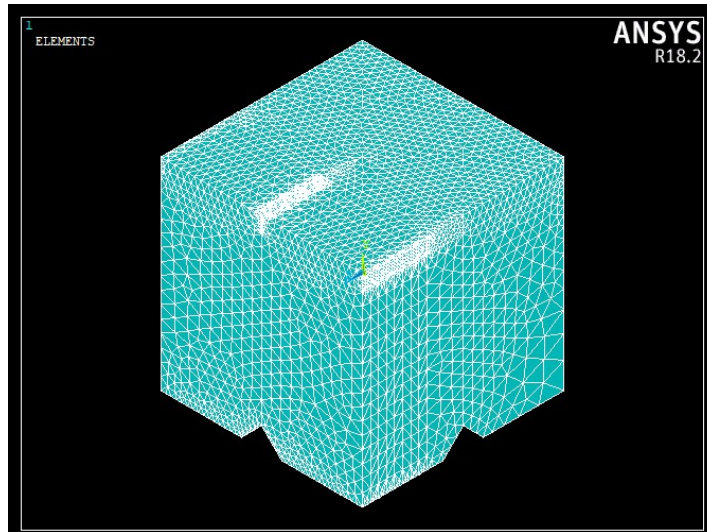
Atlikus šiuos eksperimentinius tyrimus, nuspręsta, kad lazerinio legiravimo procesui atlikti bus naudojama nuolatinės veikos 500 W lazerio galia (P), ir 1,2 mm lazerio dėmės skersmuo (d), šitaip siekiant dar labiau sukoncentruoti lazeriu tiekiamą energiją ir gauti gilesnius legiruotus sluoksnius. Taip pat parinktas platesnis lazerio skenavimo greičių diapazonas, siekiant ištirti legiruojamųjų priedų poveikį paviršinėms savybėms.

2.4. LSA proceso skaitinis modeliavimas BE metodu

Tiriamąjį darbo metu buvo dar kartą atliktas skaitinis modeliavimas, jo metu tirti SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno bandinio lazerinio paviršiaus modifikavimo (legiravimo) metu vykstantys šilumos mainai ir temperatūrinis pasiskirstymas. Skaitinio modeliavimo BE metodu tyrimas atliktas siekiant įvertinti pasirinktų LSA proceso parametrų skirtingų režimų naudingumą. Tyrimas atliktas „ANSYS Mechanical APDL R18.2“ programinės įrangos paketu.

2.4.1. LSA proceso skaitinio modeliavimo BE metodu metodika

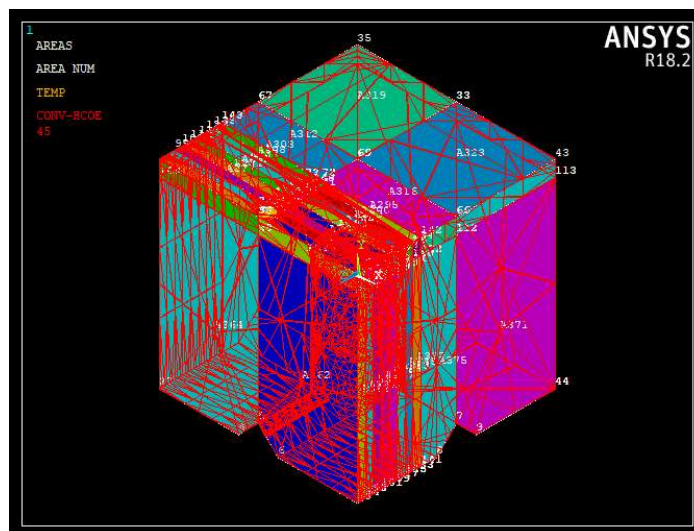
Tiriamasis bandinys – 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno kūbas, kurio ilgis, aukštis ir plotis yra 15 mm. Buvo sukurtas šio bandinio konstrukcinis modelis, kuris sudalytas į 25000, 8 mazgų „Brick & Node 278“ baigtinius elementus. Erdvinis į BE sudalytas modelis pateiktas 2.10 pav. Tiriamajam modeliui priskirtos 1.2709 markės plieno savybės, nurodytos 2.12 lentelėje.



2.10 pav. SLM technologija sulydyto bandinio 3D modelis sudalytas į baigtinius elementus

Skaiciavimo metu modeliui priskirtos lazerinio paviršiaus modifikavimo režimo sąlygos ir apkrovos (2.11 pav.). Modeliavimui panaudoti 4 skirtingų lazerinio paviršiaus modifikavimo režimų parametrai, su pastovia nuolatinės veikos lazerio galia $P = 500 \text{ W}$ ir lazerio spindulio dėmės skersmeniu $d = 1,2 \text{ mm}$, bei kintančiais parametrais – lazerio skenavimo greičiais $v = 8,7; 55; 67; 91 \text{ cm/min}$.

Šilumos mainų skaičiavimui baigtinių elementų metodu naudota metodika aprašyta šio darbo 2.2.5 poskyryje.



2.11 pav. SLM technologija sulydyto bandinio 3D modelis su priskirtomis lazerinio paviršiaus modifikavimo sąlygomis

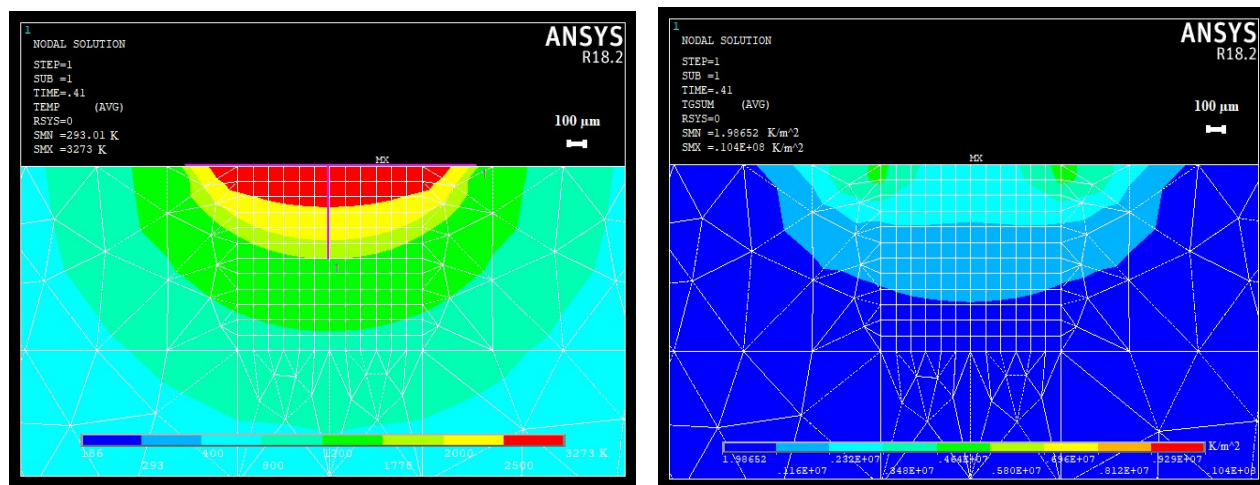
2.4.2. LSA proceso skaitinio modeliavimo tyrimo rezultatai

SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno 1.2709 bandinio lazerinio paviršiaus modifikavimo skaitinis modeliavimas atliktas siekiant įvertinti lazeriu perlydytos zonos geometrinius parametrus, tiriamąjį bandinį apdorojant skirtingais LSA proceso režimais, taip pat įvertinti temperatūros gradientą prie skirtingų lazerinio apdorojimo režimų.

Sprendžiant temperatūrinių laukų kitimo uždavinius kietajame kūne, labai didelę įtaką turi kontakto vietų šilumos mainų procesai. Paviršiaus šilumos perdavimo natūraliosios konvekcijos būdu koef., lemia detalės temperatūros laukų pasiskirstymą.

Programine įranga atlikti skaičiavimai su skirtingais lazerinio paviršiaus modifikavimo režimo parametrais ir pateikti temperatūros pasiskirstymo ir temperatūros gradiento rezultatai. Pagal temperatūros pasiskirstymo grafikus, naudojantis „Optika Vision Lite“ programinės įrangos paketu išmatuoti lazeriu perlydyto sluoksnio geometriniai parametrai (gylis ir plotis):

a) Temperatūros ir temperatūros gradiento (2.12 pav.) pasiskirstymas, apskaičiuotas skaitinį modeliavimą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Perlydytos medžiagos gylis – 581 μm , o plotis – 1838 μm .



2.12 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 8,7 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 8,7 cm/min

b) Skaitinį modeliavimą atliekant 55 cm/min lazerinio skenavimo greičiu, papildomai buvo tiriamas poveikis temperatūros ir temperatūros gradiento pasiskirstymui, lazerio spinduliavimą atliekant 4 paėiliui einančiuose taškuose, siekiant įvertinti kokią įtaką perlydymo gyliui turi aušimo

procesas ir bandinio geometrija. Grafikuose pateikiami temperatūros ir temperatūros gradiento pasiskirstymai:

1 taške – temperatūros pasiskirstymas ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (2.13 pav.).

Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 378 μm , o plotis – 1490 μm .

2 taške – temperatūros pasiskirstymas ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (2.14 pav.).

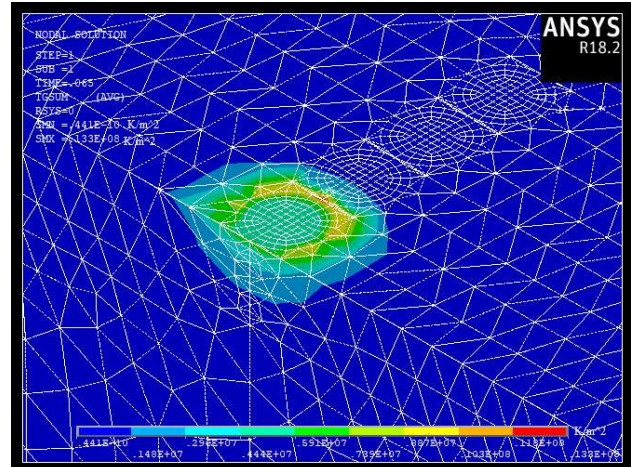
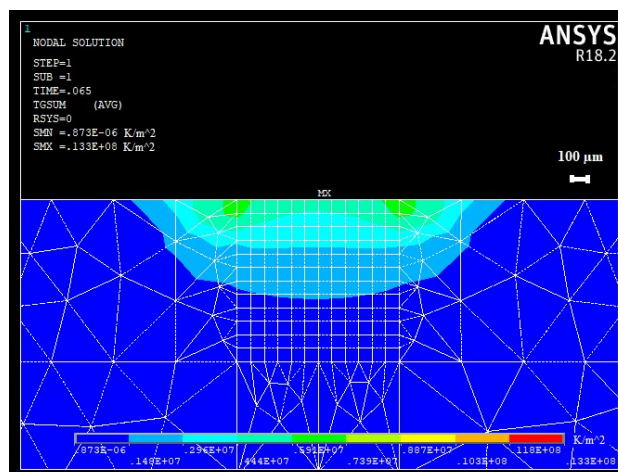
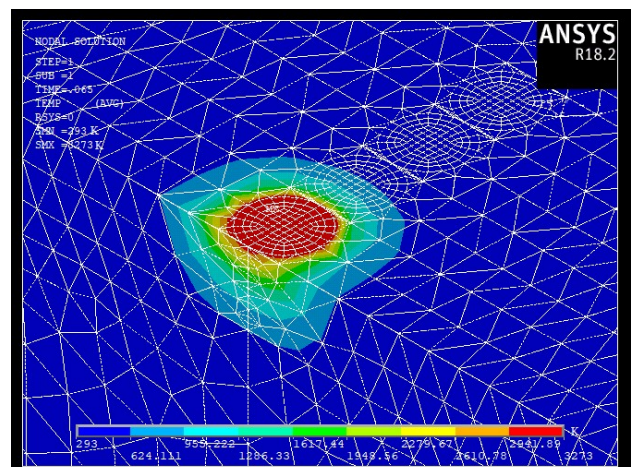
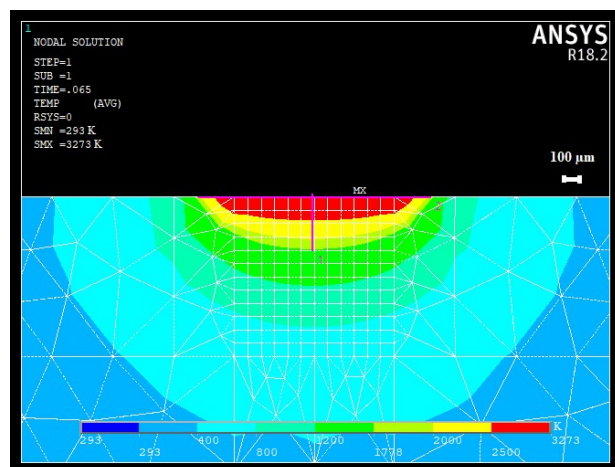
Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 408 μm , o plotis – 1527 μm .

3 taške – temperatūros pasiskirstymas ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (2.15 pav.).

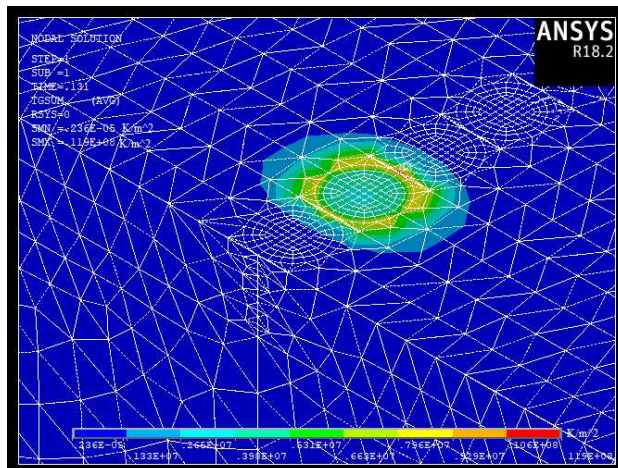
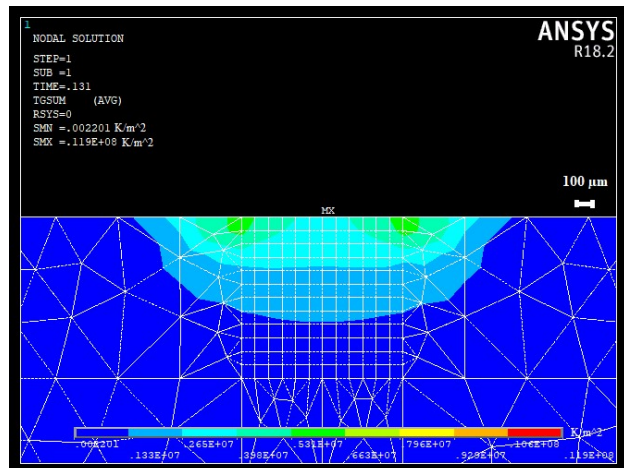
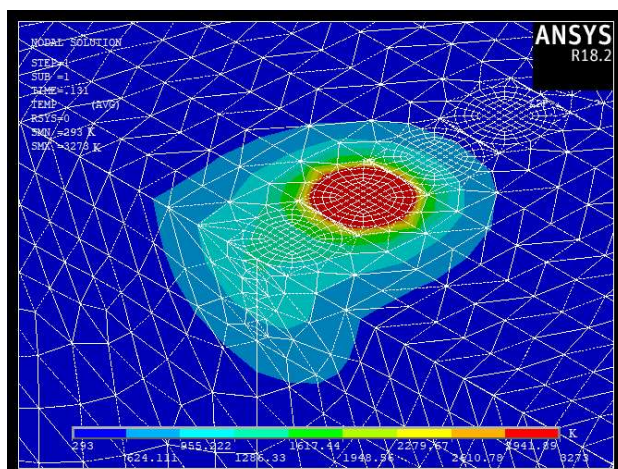
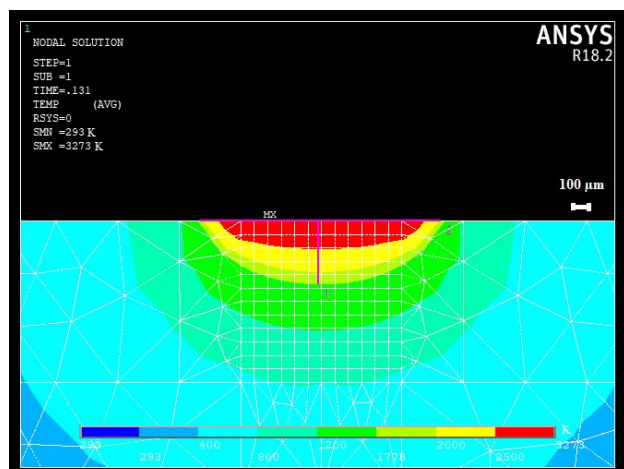
Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 439 μm , o plotis – 1606 μm .

4 taške – temperatūros pasiskirstymas ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (2.16 pav.).

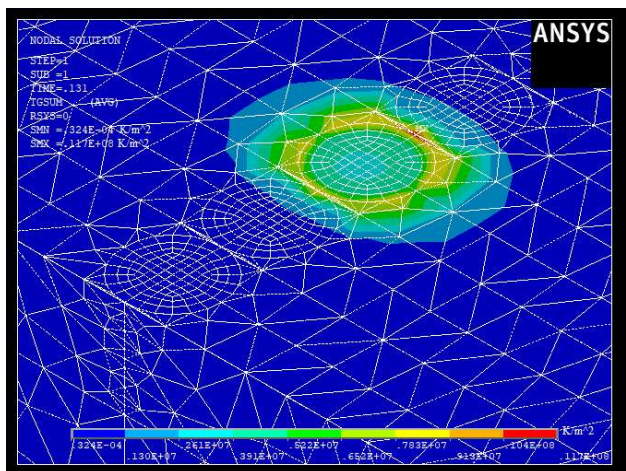
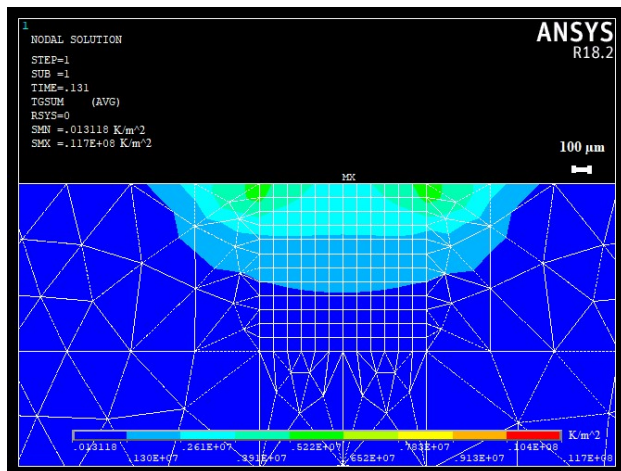
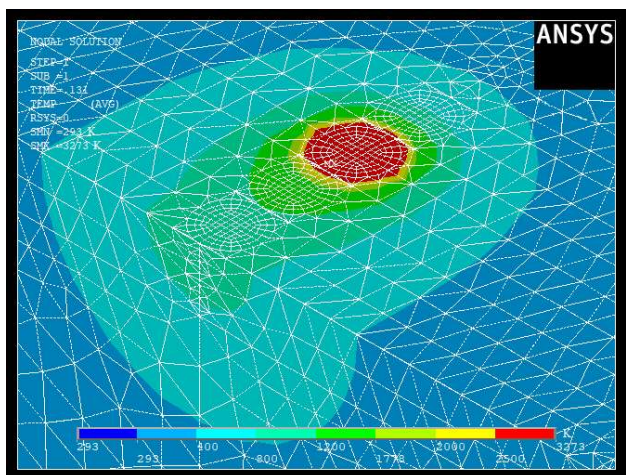
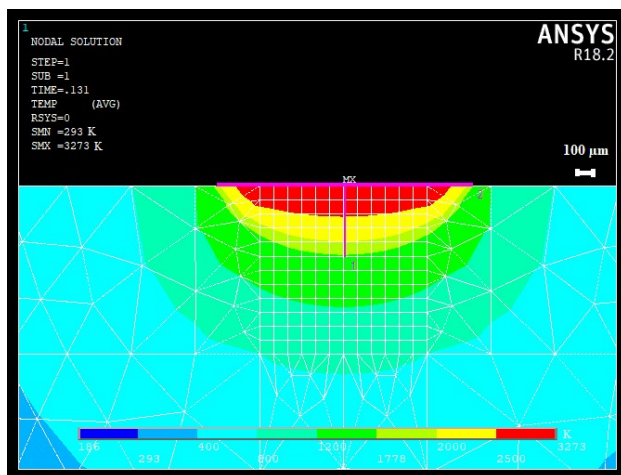
Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 447 μm , o plotis – 1587 μm .



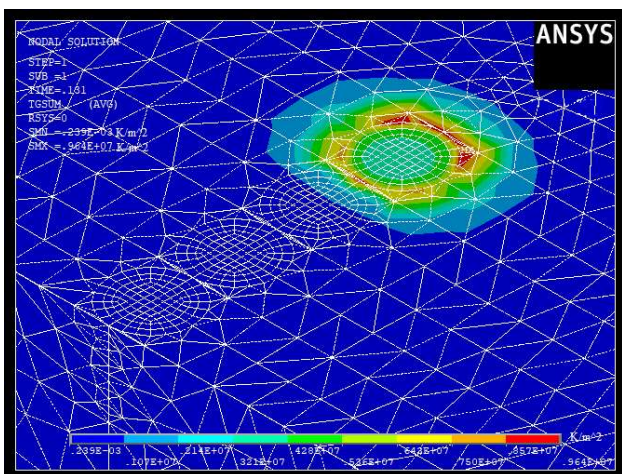
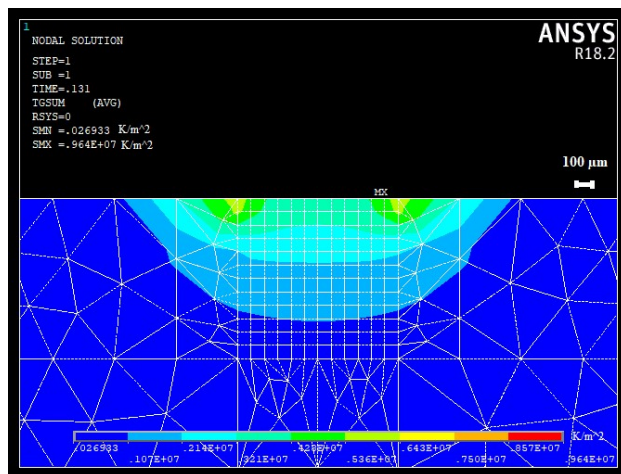
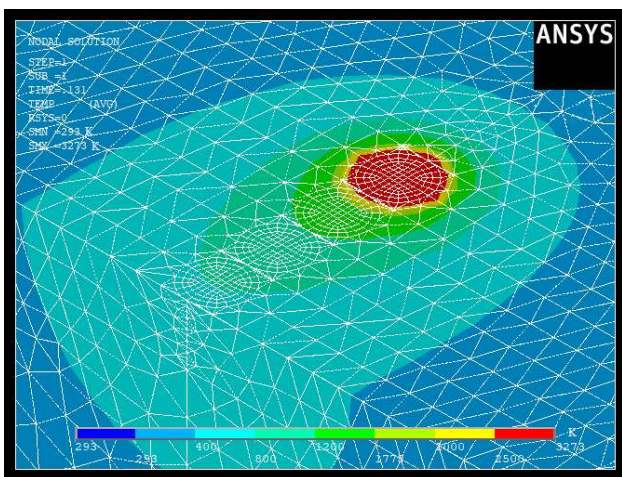
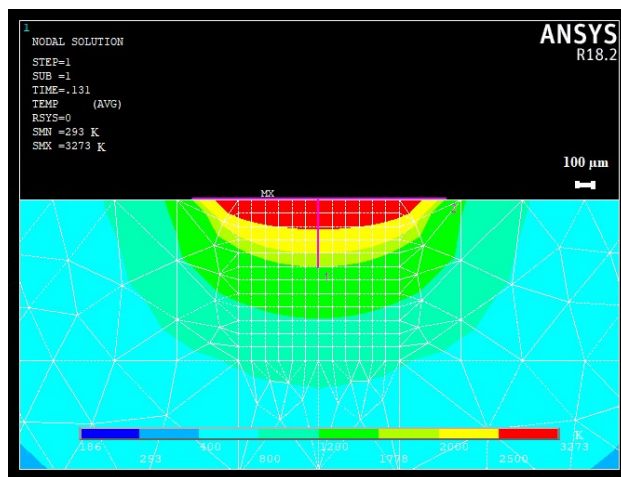
2.13 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 1 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 1 taške (poveikio laikas 0,065 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas



2.14 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 2 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 2 taške (poveikio laikas 0,196 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas

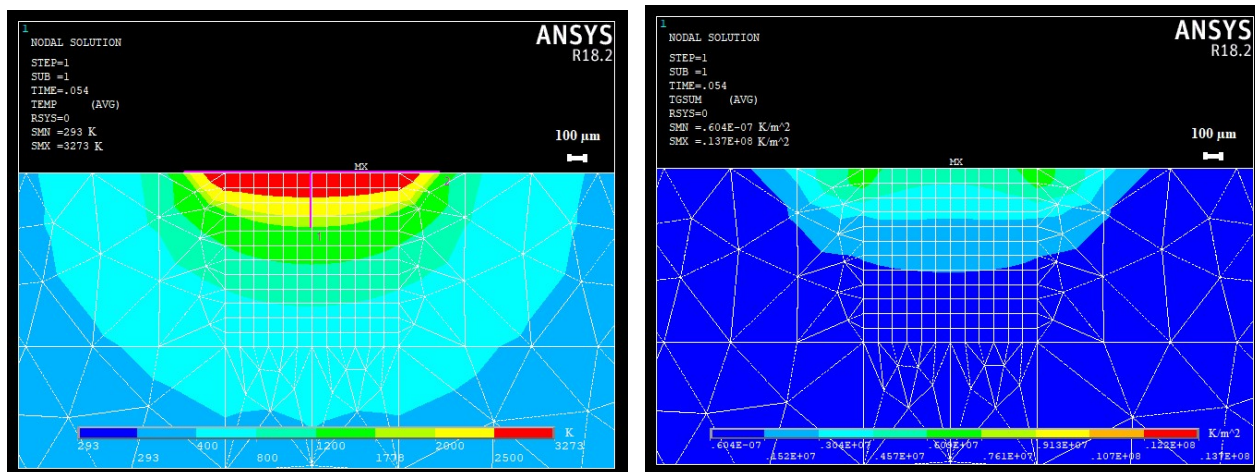


2.15 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3 taške (poveikio laikas 0,327 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas



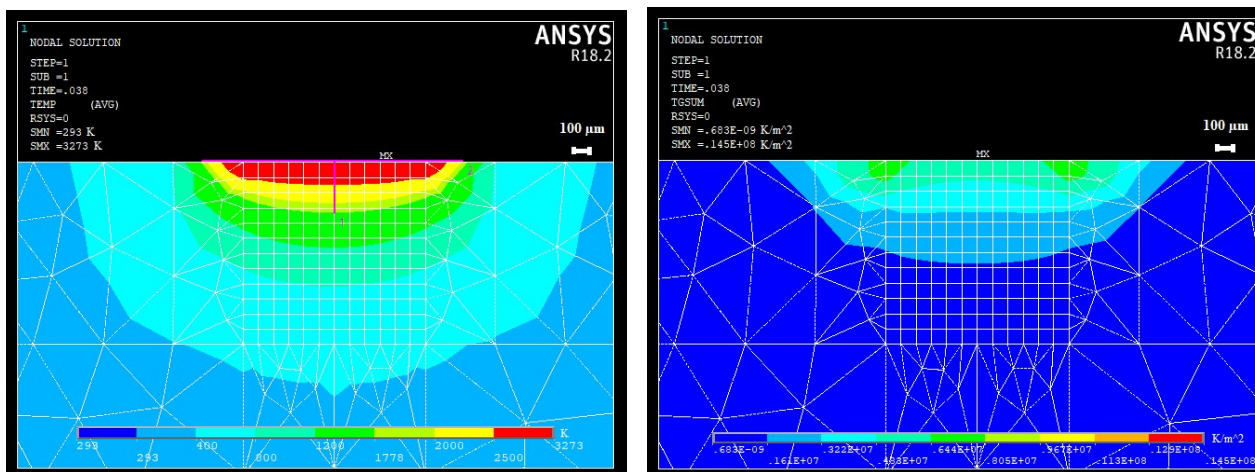
2.16 pav. Viršuje kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 4 taške 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Viršuje dešinėje: 3D vaizdas. Apačioje kairėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 4 taške (poveikio laikas 0,458 s) 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 55 cm/min. Apačioje dešinėje: 3D vaizdas

c) Temperatūros ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (Pav. 2.17 pav.), apskaičiuotas skaitinį modeliavimą atliekant 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 350 μm , o plotis – 1615 μm .



2.17 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 67 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 67 cm/min

d) Temperatūros ir temperatūros gradiento pasiskirstymas (2.18 pav.), apskaičiuotas skaitinį modeliavimą atliekant 91 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Išmatuotas perlydytos medžiagos gylis – 333 μm , o plotis – 1648 μm .



2.18 pav. Kairėje: temperatūros (K) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 91 cm/min. Dešinėje: temperatūros gradiento (K/m^2) pasiskirstymas 3D modelį apdorojant lazeriu, kai skenavimo greitis 91 cm/min

2.4.3. LSA proceso skaitinio modeliavimo BE metodu rezultatų apibendrinimas

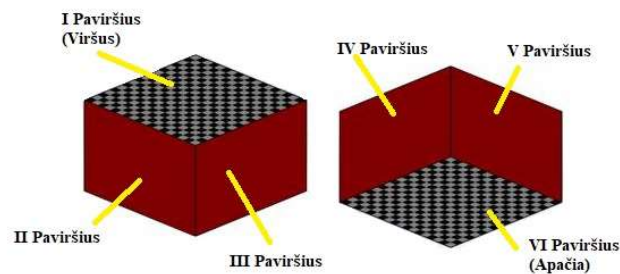
Atliekant LSA proceso skaitinį modeliavimą baigtinių elementų metodu gauti pakankami geri lazeriu modifikuotų takelių geometrinių parametrų rezultatai, kurie pateikti 2.17 lentelėje. Pasiękti naudingi perlydytų sluoksnių gyliai ir pločiai. Nuspręsta šiuos LSA režimus naudoti ir atliekant eksperimentinius tyrimus.

2.15 lentelė. LSA proceso skaitiniu modeliavimu BE metodu nustatyti geometriniai lazeriu apdoroto takelio parametrai

Lazerio skenavimo greitis v , cm/min	Geometriniai skaitiniu modeliavimu BE metodu apskaičiuoti rezultatai	
	Gylis, mm	Plotis, mm
8,7	0,581	1,838
55	0,399	1,749
67	0,387	1,728
91	0,335	1,653

2.5. SLM technologija pagamintų bandinių paskesnio lazerinio legiravimo režimai

Tyrimo metu, siekiant pagerinti SLM technologija pagaminto bandinio paviršines savybes, atliktas lazerinis paviršiaus legiravimas nuolatinės veikos CO₂ lazeriu, naudojant legiruojamuosius priedus, kurie buvo parinkti atliekant literatūros šaltinių analizę. LSA atliktas naudojant boro karbido (B₄C), kobalto borido (Co₃B), titano karbido (TiC) ir tantalio disilicido (TaSi₂) legiruojamuosius priedus.



2.19 pav. Bandinių paviršių suskirstymas

Lazerinio legiravimo technologija apdoroti šoniniai, mechaniškai neapdirbti bandinio paviršiai. Bandinio paviršių suskirstymas pavaizduotas 2.19 pav., o legiruojamųjų priedų paskirstymas nurodytas 2.18 lentelėje.

2.16 lentelė. Legiruojamųjų priedų paskirstymas

Paviršio Nr.	Lazerinio legiravimo priedai
II	B_4C – boro karbidas
III	Co_3B – kobalto boridas
IV	TiC – titano karbidas
V	$TaSi_2$ – tantalio silicidas

Tyrimo metu bandinys legiruotas skirtingais režimais, kurie parinkti atlikus bandomuosius eksperimentinius tyrimus ir patikrinti atliekant LSA proceso skaitinį modeliavimą baigtinių elementų metod. Ant kiekvieno iš lazeriu apdorojamų paviršių, suformuoti 5 skirtingu lazerio skenavimo greičiu legiruoti takeliai. Iš viso LSA procesu suformuota 20 legiruotų takelių 4-iose SLM bandinio paviršiuose. LSA proceso režimų parametrai nurodyti 2.19 lentelėje. Visais LSA proceso režimais naudojama pastovi lazerio spindulio galia (P) ir lazerio spindulio dėmės skersmuo (d), kurie parinkti pagal ankstesniame tyrimų etape atliktus bandomuosius eksperimentinius tyrimus.

2.17 lentelė. SLM bandinio paskesnio LSA CO₂ lazeriu režimai

Lazerio tipas	Nuolatinės veikos CO ₂ lazeris
Lazerio spindulio dėmės skersmuo – d	1,2 mm
Vidutinė lazerio spindulio galia – P	500 W
Apsauginės dujos	Argonas (Ar)
Skenavimo greitis – v	8,7 cm/min
	55 cm/min (2x)
	67 cm/min
	91 cm/min

Lazerinio paviršiaus legiravimui atlikti naudotos legiruojamųjų priedų pastos. Legiruojamojo priedo milteliai sumaišyti su organiniu rišikliu (3 mas. %) ir acetonu (iki skystos pastos konsistencijos). Paruošta pasta buvo užtepta ant bandinio paviršiaus ir nubraukta, paliekant tik tą pastos dalį, kuri užpildė įdubimus bandinio paviršiuje. Prieš lazerinį apdorojimą bandinys išdžiovintas krosnyje 150±5 °C temperatūroje 2 h.

2.6. Lazериu apdorotų paviršių tyrimo metodika

2.6.1. Optinė mikroskopija

Lazeriu legiruotų SLM bandinių paviršių optinės mikroskopijos tyrimams atlikti naudotas analitinis NICON ECLIPSE MA200 optinis mikroskopas (2.20 pav.), aprūpintas integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Paviršių mikrostruktūros tyrimai atlikti naudojant 5, 10, 20 ir 50 kartų didinimo objektyvus ir 10 kartų didinimo okuliarą.



2.20 pav. NICON ECLIPSE MA200 analitinis mikroskopas

Baigiamajame darbe optinė mikroskopija buvo naudojama tiriamųjų bandinių lazeriu legiruotų paviršių geometrinių parametrų tyrimui, defektų nustatymui, makroanalizei ir mikrostruktūros tyrimams atlikti. Tyrimo metu buvo sufokusuoti lazeriu legiruotų bandinių paviršių skersinių pjūvių vaizdai ir skaitmene kamera padarytos jų nuotraukos. Gautos nuotraukos apdorotos ir analizuotos programinės įrangos paketu „Optika Vision Lite 2.1“.

Optinės mikroskopijos tyrimams atlikti buvo paruošti lazeriu legiruotų SLM bandinių paviršių mikrošlifai. Mikrošlifams paruošti bandiniai buvo patalpinti į apvalias plastikines formeles ir užlieti epoksidine derva.

Toliau bandiniams atliktas mechaninis šlifavimas aušinant vandeniu, su skirtingo grūdėtumo popieriumi. Šlifavimo popierius buvo keičiamas šia seka: P200 → P400 → P600 → P1200 → P2500. Paviršių šlifavimas atliktas ant specialaus įrenginio su besisukančiu disku, ant

kurio paviršiaus pritvirtinamas šlifavimo popierius. Kiekvieną kartą keičiant popierių, bandinys pasuktas 90° kampu.

Atlikus bandinių paviršių šlifavimą, toliau atliktas poliravimas. Poliravimas buvo atliktas naudojant skirtingo grūdėtumo poliravimo emulsijas, kurių grūdėtumas 2; 1 ir 0,5 µm. Emulsijos buvo naudojamos mažėjančia tvarka, pradedant rupiausia ir baigiant smulkiausia. Tarp poliravimo skirtingo grūdėtumo emulsijomis bandiniai buvo nuplauti vandeniu, poto nuvalyti acetonu (C₃H₆O) ir džiovinti karšto oro srove. Lazериu legiruoti SLM bandiniai, po poliravimo buvo ęsdinami tirpalu, kurio sudėtis:

- Vanduo (H₂O) – 1/7 tirpalo dalis (~14,3 %).
- Acto rūgštis (CH₃COOH) – 1/7 tirpalo dalis (~14,3 %).
- Druskos rūgštis (HCl) – 4/7 tirpalo dalys (~57,1 %).
- Azoto rūgštis (HNO₃) – 1/7 tirpalo dalis (~14,3 %).

Bandiniai buvo panardinti į tirpalą 30 sekundžių.

2.6.2. Mikrokietumo matavimai

Tyrimo metu atlikti lazerinio legiravimo būdu apdorotų SLM bandinių paviršių mikrokietumo matavimai Knopo metodu. Matavimai atlikti pagal LST EN ISO 4545-1:2018 en „Metalinės medžiagos. Knopo kęčio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas“ standarto nurodymus.

Knopo bandymo parametrai nurodyti 2.20 lentelėje.

2.18 lentelė. Knopo mikrokietumo bandymo parametrai

Parametras	Vertė
Apkrova (angl. <i>LOAD</i>)	200 g
Išlaikymas	10 s
Bandymo žingsnio matmenys pagal LST EN ISO 4545-1:2018 EN	
Žingsnis vertikaliai	50 µm
Žingsnis horizontaliai	160 µm

Tyrimai atlikti universaliu automatizuotu kietmačiu *Zwick Roell ZHµ* (2.21 pav.) su 1 % matavimo paklaida. Atliekant mikrokietumo matavimus, tirtas paviršinių sluoksnių mikrokietumo kitimas gilyn nuo bandinio paviršiaus ir apskaičiuotos vidutinės lazериu legiruotos zonos mikrokietumo vertės.



2.21 pav. Universalus automatizuotas kietmatis „Zwick Roell ZHμ“

2.6.3. Tamprumo modulio nustatymas

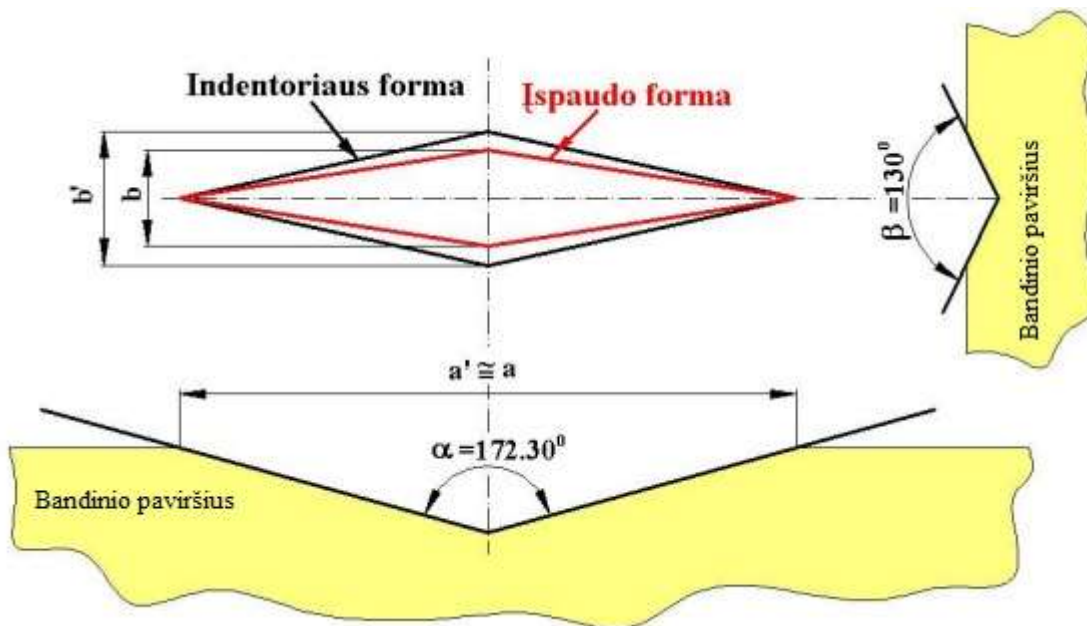
Atlikus lazeriu legiruotų sluoksnių mikrokietumo matavimus, fizikinėms lazeriu legiruotų sluoksnių savybėms įvertinti buvo atlikti tamprumo modulio skaičiavimai taikant mokslininkų B. R. Lawn ir V. R. Howes sukurtą tamprumo modulio nustatymo metodiką (Lawn ir Howes, 1981).

Tamprumo modulio nustatymo metodika paremta tuo, kad atliekant matavimą aplink indentorių susidaro tampriųjų ir plastinių deformacijų zonos (2.22 pav.). Matuojant indentoriaus padarytą deformaciją, randamas kietumas, o naudojantis kietumo matavimu metu palikto įspaudo geometriniais parametrais, apskaičiuojamas tamprumo modulis.

Knopo indentoriaus įspaudo rombo įstrižainės yra nevienodos. Jų proporcijas nulemia indentorius geometrija. Įstrižainių ilgių santykis yra $b'/a' = (1/7,11)$. Panaikinus apkrovą, dėl tampriųjų deformacijų sumažėja įspaudo įstrižainių ilgiai, ilgosios įstrižainės ilgio pokytis yra labai mažas, todėl priimama, kad $a \cong a'$ (2.23 pav.).



2.22 pav. Tamprioji ir plastinė deformacija matuojant kietumą Knopo metodu



2.23 pav. Knopo indentoriaus įspaudo eskizas

Kietumas pagal Knopo metodą randamas pagal formulę:

$$H_K = 14229 \frac{P}{a^2}; \quad (2.26)$$

čia: H_K – mikrokietumas, (kg/mm^2); P – svoris, kuriuo spaudžiamas indentorius, (g); a – ilgoji įspaudo rombo įstrižainė, (μm) (Lawn ir Howes, 1981).

Tamprumo modulis E apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{b}{a} \cong \frac{b}{a'} = \frac{b'}{a'} = \frac{\alpha H_K}{E}; \quad (2.27)$$

čia: a – ilgoji įspaudo rombo įstrižainė, (μm); a' ir b' – indentoriaus įstrižainių ilgiai, (μm); α – konstanta, $\alpha=0,45$; E – tamprumo modulis, (kg/mm^2) (Lawn ir Howes, 1981).

Siekiant apskaičiuoti lazeriu legiruočių sluoksnių tamprumo modulį atlikti Knopo metodo bandymo metu padarytų įspaudų įstrižainių a ir b matavimai.

Apskaičiuoti tiriamojo įspaudų tamprumo moduliai lazeriu legiruotame bandinio sluoksnyje.

$$E_T = 0,45 \cdot \frac{H_K}{(1/7,11) - a/b}; \quad (2.28)$$

čia: E_T – tamprumo modulis (kg/mm^2); H_K – Knopo metodu išmatuotas mikrokietumas (kg/mm^2); a – horizontalioji įspaudų įstrižainė (μm); b – vertikalioji įspaudų įstrižainė (μm).

Apskaičiuotos tamprumo modulio E_T vertės konvertuojamos į vertes paskaliais (Pa), taikant formulę:

$$E = E_T \cdot 9,806; \quad (2.29)$$

čia: E – tamprumo modulis (Pa).

Skaičiavimai buvo atlikti su visais Knopo mikrokietumo bandymo metu gautais įspaudais ir iš gautų verčių apskaičiuoti vidutiniai lazeriu legiruočių sluoksnių tamprumo moduliai naudojant skirtingus legiruojamuosius priedus ir lazerinio apdorojimo režimus. Atlikus skaičiavimus rezultatai palyginti tarpusavyje ir su lazeriu neapdoroto bandinio tamprumo moduliu.

2.6.4. Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos tyrimas

Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybinių medžiagų institute. Tyrimai atlikti SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisu su antrinių elektronų SE detektoriumi (2.24 pav.).

Elektroninės mikroskopijos parametrai: greitinančioji įtampa – 10 kV, atstumas iki bandinio paviršiaus – 8 mm, padidinimas nuo 400 iki 2000 kartų, temperatūra – 22 °C.

SEM būdu antrinių elektronų signalu tirtas SLM technologija pagaminto bandinio paviršius. Prieš tyrimą paviršius buvo chemiškai nuvalytas acetonu (C_3H_8O), siekiant pašalinti įvairius paviršiaus nešvarumus.



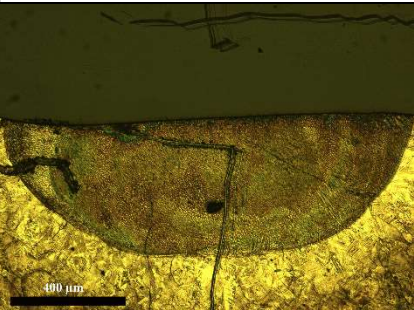
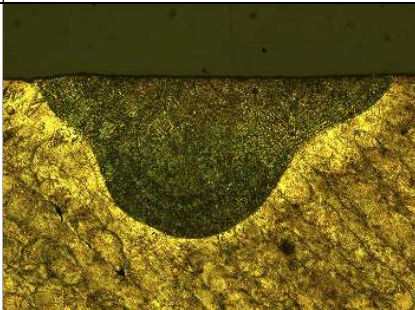
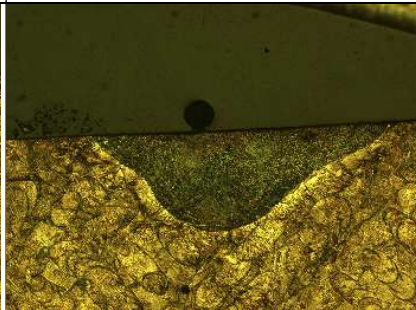
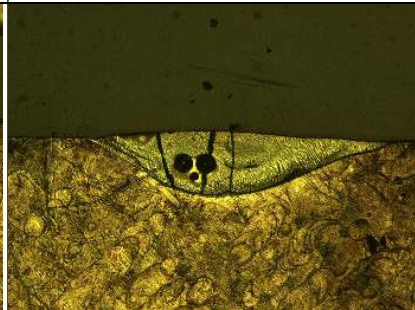
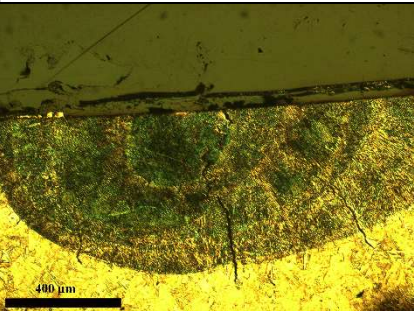
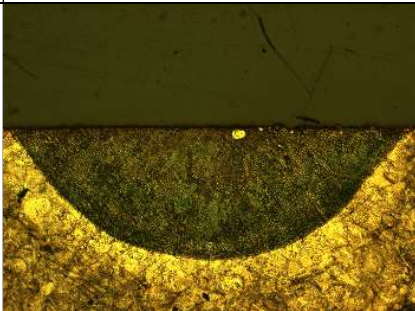
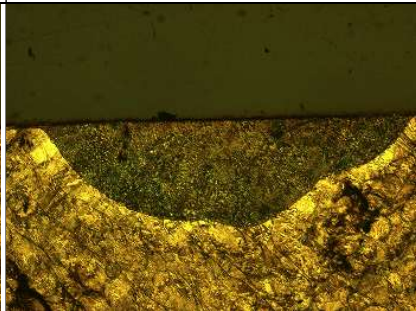
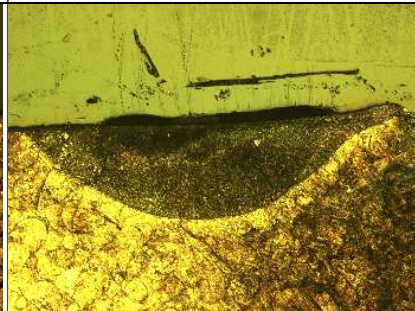
2.24 pav. SEM JOEL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisas su antrinių elektronų SE detektoriumi

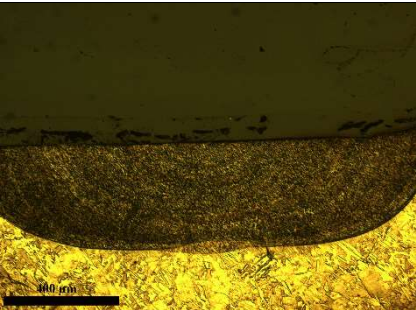
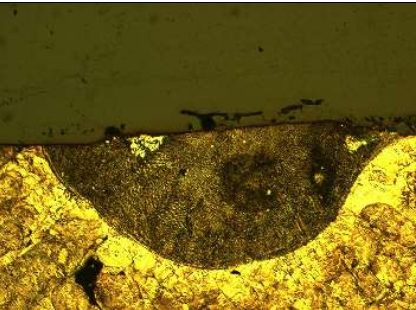
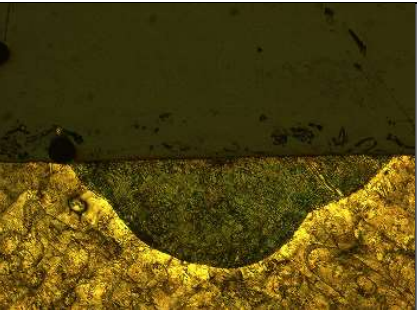
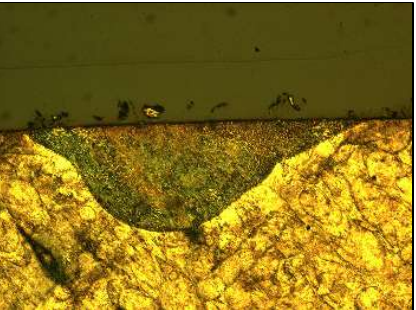
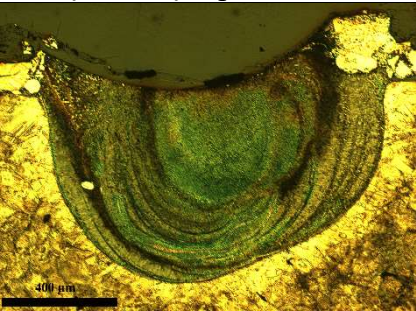
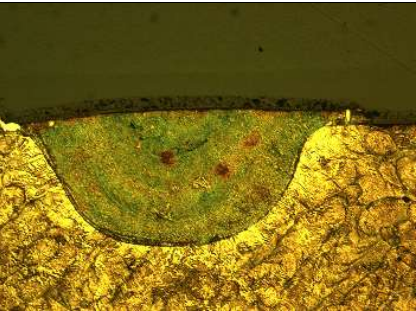
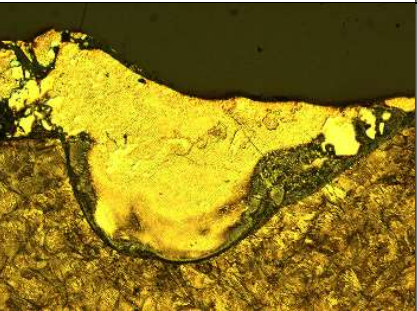
3. TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI

3.1. Makroskopinės analizės tyrimo rezultatai

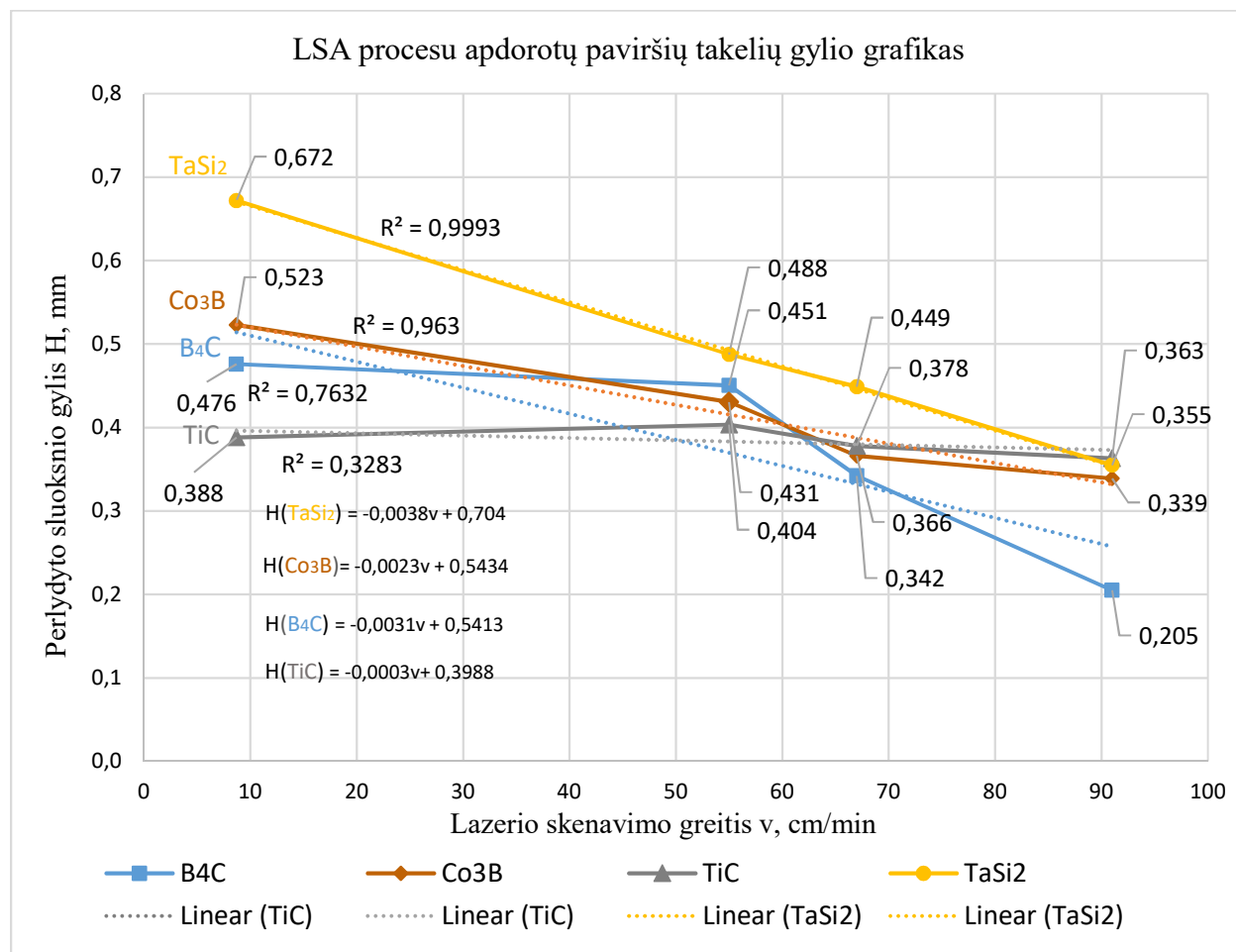
Taikant optinės mikroskopijos tyrimo metodus, buvo atlikti SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno bandinio LSA procesu apdorotų paviršių geometriniai tyrimai, matuotas gylis, plotis, bei atlikta makroskopinė analizė, kurios metu įvertinti lazeriu legiruoto sluoksnio defektai, įtrūkiai, poros, metalo ištaškymas. Rezultatų duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Martensitinio sendinamo plieno bandinio paviršiuje LSA procesu suformuotų takelių skersinių pjūvių nuotraukos

Legiruojamasis elementas		Lazerio skenavimo greitis			
		8,7 cm/min	55 cm/min	67 cm/min	91 cm/min
B ₄ C					
Geometriniai par., mm	Gylis	0,476	0,451	0,342	0,205
	Plotis	1,418	1,162	1,023	1,039
Defektai, pastabos		Susiformavo platus legiruoto sluoksnio takelis, tačiau centre pastebėta pora, taip pat keletas nedidelių įtrūkių.	Susiformavo gilus ir platus perlydyto ir legiruoto sluoksnio takelis be pastebimų defektų.	Susiformavusiame lazeriu legiruotame sluoksnyje ryškių defektų nepastebėta.	Procesą atliekant didžiausiu greičiu, takelyje susidarė ryškūs įtrūkiai per visą takelio gylį ir keletas porų.
Co ₃ B					
Geometriniai par., mm	Gylis	0,523	0,431	0,366	0,339
	Plotis	1,650	1,364	1,281	1,271
Defektai, pastabos		Susiformavo gilus ir platus lazeriu legiruotas sluoksnis, tačiau centre pastebimi ryškūs įtrūkiai: kraštuose per apytiksliai 1/3 takelio gylį, o centre per visą.	Susiformavo gražios ir geros formos, be pastebimų defektų ar įtrūkimų lazeriu legiruotas sluoksnis.	Susiformavusiame takelyje ryškių defektų nepastebėta	Paviršiaus dešiniajame krašte susidarė nedidelė užlaja, daugiau pastebimų defektų nerasta.

TiC					
Geometriniai par., mm	Gylis	0,388	0,404	0,378	0,363
	Plotis	2,212	1,238	1,124	1,126
Defektai, pastabos		Susiformavo labai platus, tačiau mažesnio gylio takelis negu legiruojant kitais priedais. Pastebimų defektų ar įtrūkimų nepastebėta.	Susiformavo gilus, geros formos su nedidele rumbele legiruotas sluoksnis. Įtrūkių ar kitų defektų nepastebėta.	Didinant proceso greitį, išlaikyta panaši takelio forma, defektų ar įtrūkimų nepastebėta.	Procesą atliekant didžiausiu greičiu, defektų nepastebėta.
TaSi ₂					
Geometriniai par., mm	Gylis	0,672	0,488	0,449	0,355
	Plotis	1,199	1,097	1,169	0,884
Defektai, pastabos		Susiformavo gilus, lazerio dėmės skersmens pločio takelis. Susiformavo ryškus paviršiaus įdubimas, o kraštuose išsiliejo metalas ir pastebimas didelis ištaškymas. Įtrūkių nepastebėta.	Susiformavo gražios ir geros formos lazeriu legiruotas sluoksnis su nedidele rumbele. Metalų ištaškymas ir išsiliejimas per kraštus nedidelis. Vidinėje sandaroje defektų nepastebėta.	Susiformavo gilus ir platus, pakitusios sandaros lazeriu legiruotas takelis. Pastebimas didelis metalo ištaškymas ir išsiliejimas kairiajame krašte, susiformavusioje rumbelėje pastebimi įtrūkiai, taip pat pastebimi nežymūs įtrūkiai ir dešinėje pusėje.	Procesą atliekant didžiausiu greičiu, defektų nepastebėta.

Pagal nustatytus duomenis sudarytos lazeriu legiruotų sluoksnių gylio (3.1 pav.) ir pločio (3.2 pav.) grafikinės priklausomybės nuo lazerio skenavimo greičio.



3.1 pav. LSA procesu apdorotų paviršių takelių gylio kitimo grafikas

Pagal perlydyto sluoksnio gylio kitimo grafiką, pastebėta tendencija, kad didėjant lazerio skenavimo greičiui, perlydyto sluoksnio gylis mažėja. Naudojantis „Microsoft Excel“ programine įranga apskaičiuotos tiesinės perlydyto sluoksnio gylio kitimo priklausomybės, bei determinacijos koeficientas R^2 . Kuo determinacijos koeficiento R^2 reikšmė artimesnė 1, tuo perlydyto sluoksnio gylio kitimo kreivė artimesnė tiesinei priklausomybei. Tiesinės priklausomybės formulės ir R^2 vertės:

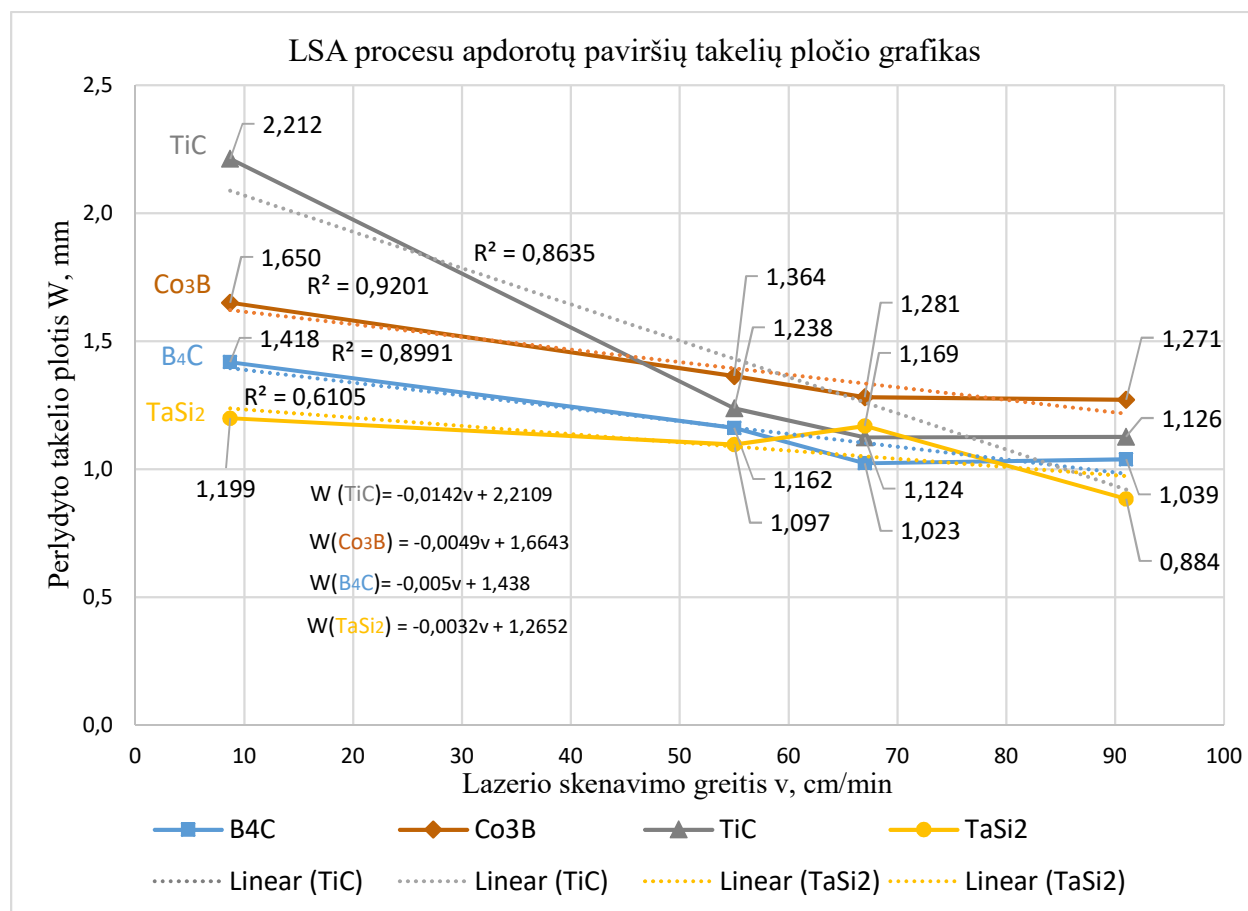
$$\text{TaSi2: } H = -0,0038v + 0,704; \quad R^2(\text{TaSi2}) = 0,9993; \quad (3.1)$$

$$\text{Co3B: } H = -0,0023v + 0,5434; \quad R^2(\text{Co3B}) = 0,963; \quad (3.2)$$

$$\text{B4C: } H = -0,0031v + 0,5413; \quad R^2(\text{B4C}) = 0,7632; \quad (3.3)$$

$$\text{TiC: } H = -0,0003v + 0,3988; \quad R^2(\text{TiC}) = 0,3283. \quad (3.4)$$

Didžiausi perlydytų sluoksnių gyliai pasiekti LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, legiruojant TaSi₂ ir Co₃B priedais. Perlydyto sluoksnio gyliai atitinkamai 0,672 mm ir 0,523 mm. Procesą atliekant su TiC legiruojamuoju priedu, išlaikytas pastovus perlydyto sluoksnio gylis LSA atliekant skirtingais greičio režimais.



3.2 pav. LSA procesu apdorotų paviršių takelių pločio kitimo grafikas

Pagal perlydyto sluoksnio pločio kitimo grafiką, taip pat pastebėta tendencija, kad didėjant lazerio skenavimo greičiui, perlydyto sluoksnio plotis mažėja. „Microsoft Excel“ programine įranga apskaičiuotos tiesinės perlydyto sluoksnio pločio kitimo priklausomybės, bei determinacijos koeficientas R^2 :

$$\text{TaSi}_2: W = -0,0032v + 1,2652; \quad R^2(\text{TaSi}_2) = 0,6105; \quad (3.5)$$

$$\text{Co}_3\text{B}: W = -0,0049v + 1,6643 \quad R^2(\text{Co}_3\text{B}) = 0,9201 \quad (3.6)$$

$$\text{B}_4\text{C}: W = -0,005v + 1,438 \quad R^2(\text{B}_4\text{C}) = 0,8991 \quad (3.7)$$

$$\text{TiC}: W = -0,0142v + 2,2109 \quad R^2(\text{TiC}) = 0,8635 \quad (3.8)$$

Sparčiausiai plotis mažėjo lazerio legiravimo procesą atliekant su TiC legiruojamaisiais priedais. Didžiausi lazeriu legiruoti ir perlydyti sluoksniai užfiksuoti procesą vykdant su TiC ir Co_3B legiruojamaisiais priedais, procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu.

Kai LSA procesas vykdytas lėčiausiu – 8,7 cm/min greičiu, perlydytuose sluoksniuose susidarė daugiausiai defektų, tokių kaip įtrūkiai ar perlydyto sluoksnio įgaubimas, kuris sumažina naudingą darbinį gylį, todėl naudingesni lazeriu legiruoti sluoksniai gauti procesą atliekant 55 cm/min ar 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu.

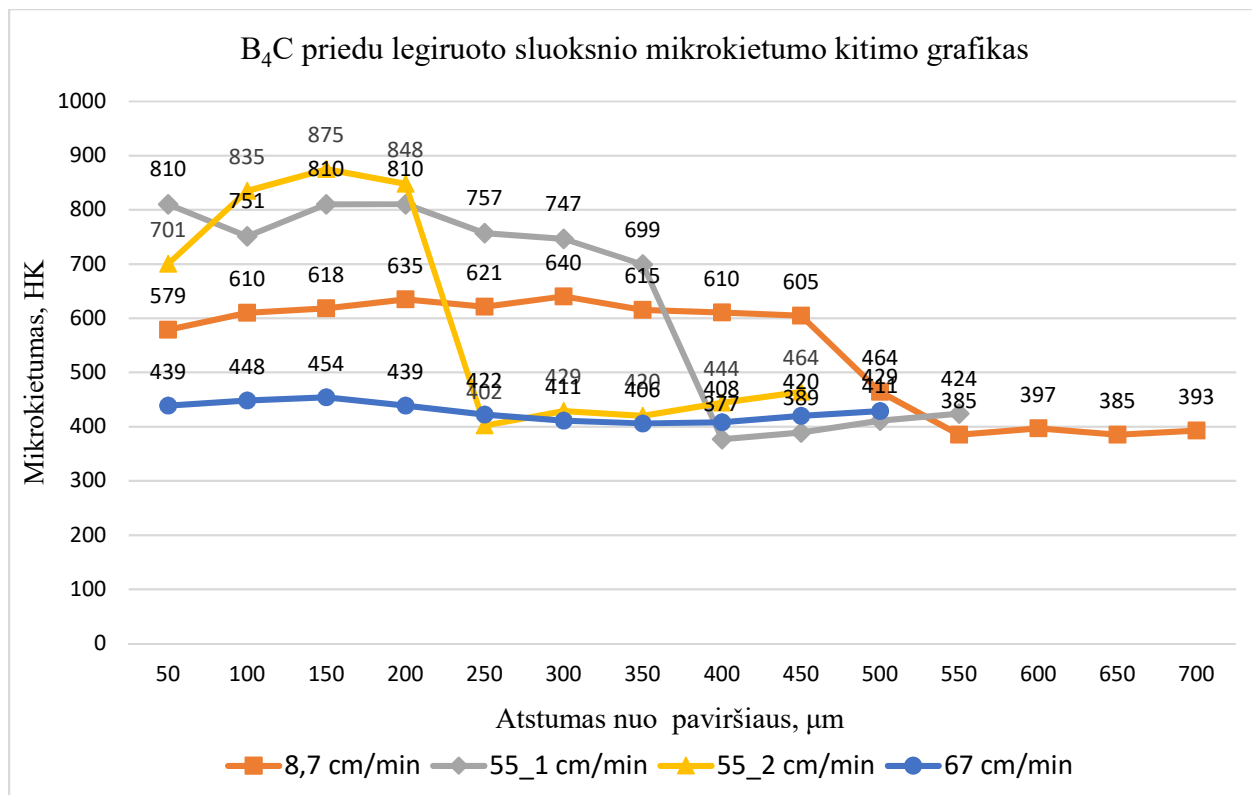
3.2. Mikrokietumo tyrimo rezultatai

Tyrimo metu, siekiant įvertinti SLM technologija pagaminto ir LSA apdoroto bandinio paviršiaus eksploatacines savybes, atlikti mikrokietumo bandymai taikant Knopo metodą. Mikrokietumo tyrimo bandymai atlikti su 200 g apkrova, išlaikant 10 s.

Atlikti įvairiais legiruojamaisiais priedais, skirtingais režimais lazeriu legiruotų sluoksnių mikrokietumo matavimai gilyn nuo bandinio paviršiaus, papildomai matuojant 4–5 žingsnius už lazeriu perlydyto sluoksnio sulydymo linijos. Vertikalios krypties matavimo žingsnio intervalas – 50 μm . Apskaičiuotos vidutinės lazeriu legiruotos zonos mikrokietumo vertės.

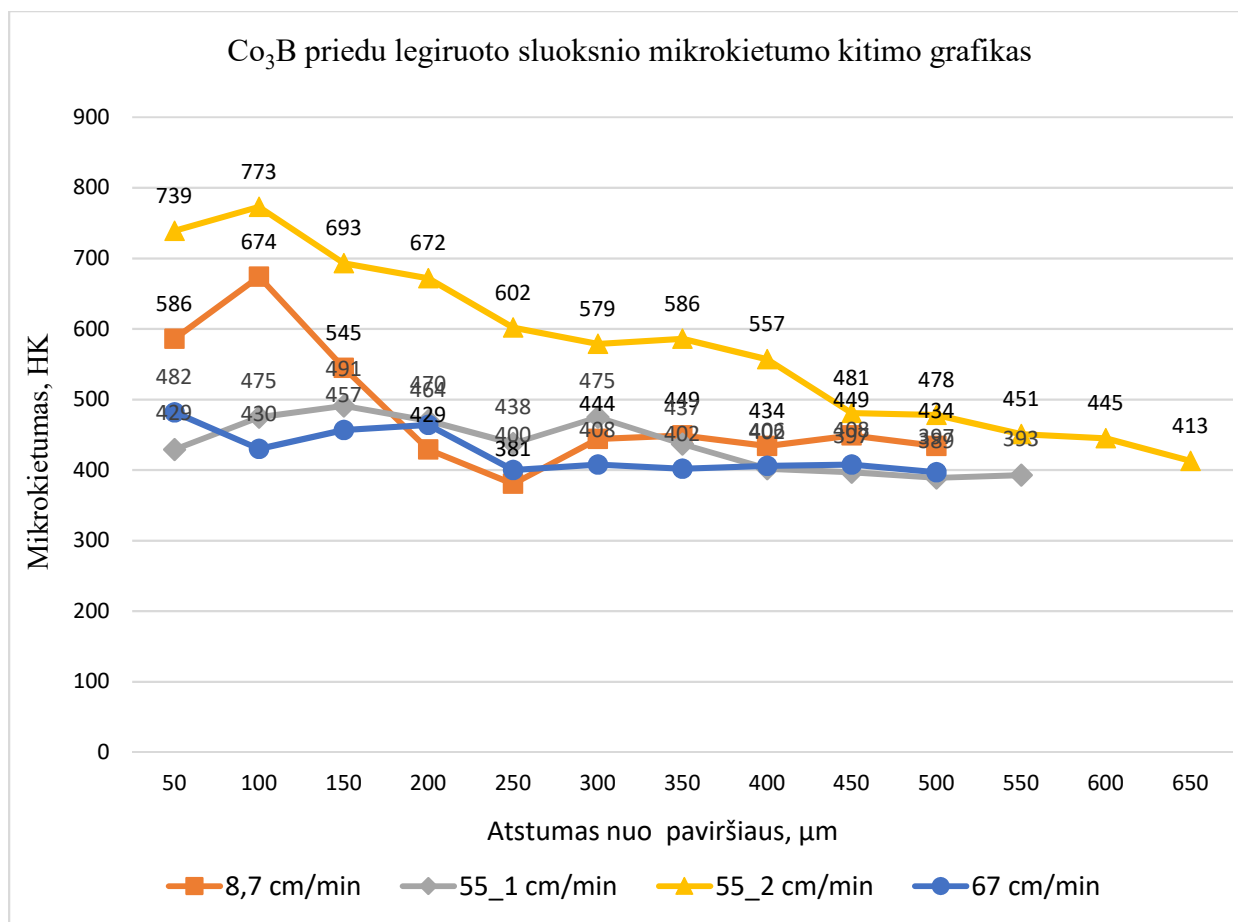
Atlikus SLM technologija pagaminto 1.2709 markės martensitinio sendinamo plieno bandinio be lazerinio paviršiaus modifikavimo mikrokietumo matavimus, nustatyta, kad mikrokietumo reikšmės svyruoja nuo 405 HK iki 468 HK. Apskaičiuota vidutinė bandinio be lazerinio paviršiaus modifikavimo mikrokietumo vertė – 424,05 HK. Taip pat apskaičiuotos ir palygintos visais LSA režimais modifikuotų paviršinių zonų mikrokietumo vertės.

Pateikiami mikrokietumo tyrimo grafikai, kuriuose matomi, skirtingais režimais, įvairiais legiruojamaisiais priedais modifikuotų paviršinių sluoksnių mikrokietumo kitimo grafikai tiriant gilyn nuo bandinio paviršiaus.



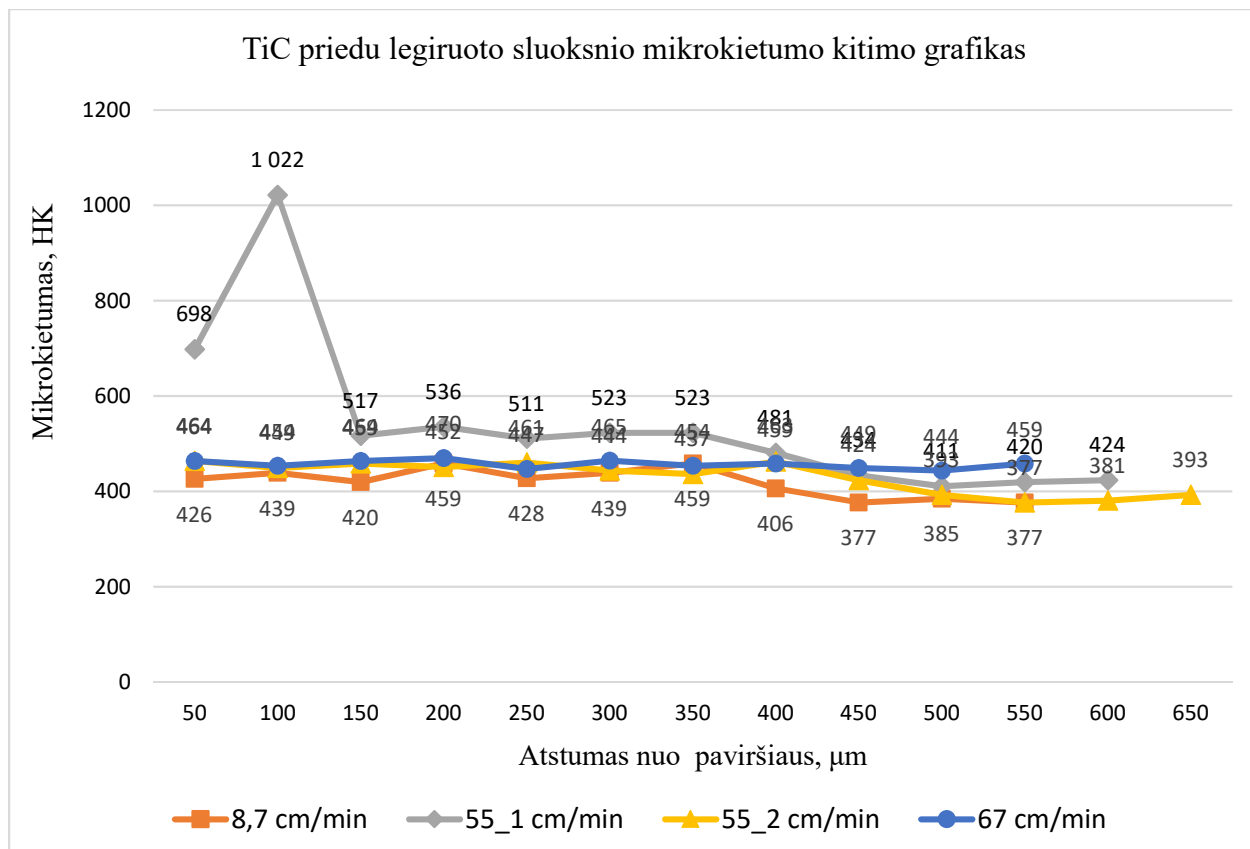
3.3 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto B₄C priedais, mikrokietumo kitimo grafikas

Tiriant lazeriu legiruotą martensitinio sendinamo plieno paviršių, legiruotą B₄C priedais (3.3 pav.), geriausias paviršiaus sukietinimo efektas pasiektas lazerinio legiravimo procesą atliekant 55 cm/min skenavimo greičiu, pasiektos perlydyto sluoksnio mikrokietumu vertės yra nuo 699 iki 875 HK, iki 350 μm gylio. Procesą atliekant 8,7 cm/min greičiu, pasiektas perlydyto sluoksnio mikrokietumas yra nuo 579 iki 605 HK, iki 450 μm gylio. Lazerinio legiravimo procesą atliekant 67 ir 91 cm/min lazerio skenavimo greičiais, paviršiaus sukietinimo efektas nebuvo reikšmingas.



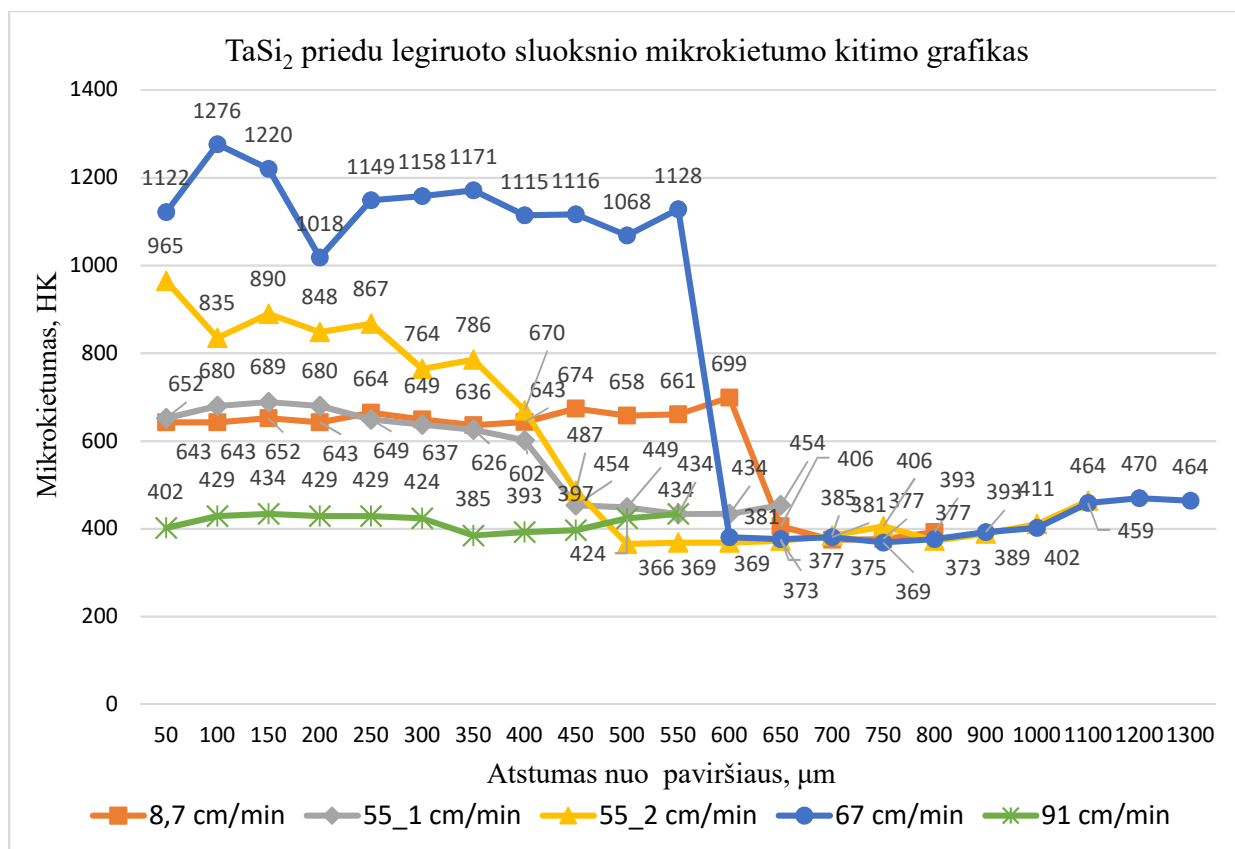
3.4 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto Co₃B priedais, mikrokietumo kitimo grafikas

Tiriant SLM bandinių paviršių, lazeriu legiruotą Co₃B priedais (3.4 pav.), nustatyta, kad paviršinių sluoksnių mikrokietumas labiausiai padidėjo procesą atlikus 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu, perlydytame sluoksnyje pasiektos mikrokietumo vertės svyruoja nuo 481 HK iki 773 HK, iki 450–500 μm gylio. LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, pasiektas paviršinių sluoksnių mikrokietumas svyruoja nuo 545 iki 674 HK, iki 150 μm gylio, dėl nemažo įtrūkimų skaičiaus šiuo režimu, gilesniuose sluoksniuose mikrokietumo padidėjimas nežymus. Lazerinį legiravimą atliekant 67 ir 91 cm/min lazerio skenavimo greičiais, nepastebimas ryškus paviršiaus sukietinimo efektas.



3.5 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto TiC priedais, mikrokietumo kitimo grafikas

Tiriant lazerinio legiravimo procesu apdoroto bandinio paviršių, legiruotą TiC priedais (3.5 pav.), žymus paviršiaus sukietinimo efektas nenustatytas. LSA procesą atliekant 55 cm/min greičiu, pasiektos lazeriu perlydytos zonos mikrokietumo verčių intervalas yra nuo 523 iki 1022 HK, iki 350 μm gylio. Didžiausias mikrokietumo matavimas (1022 HK) užfiksuotas matavime atliekant taške, kuriame matėsi nevisiškai ištirpęs titano karbido darinys. Procesą atliekant 8,7; 67 ir 91 cm/min lazerio skenavimo greičiu nustatytos mikrokietumo vertės buvo labai panašios į pagrindinio metalo.



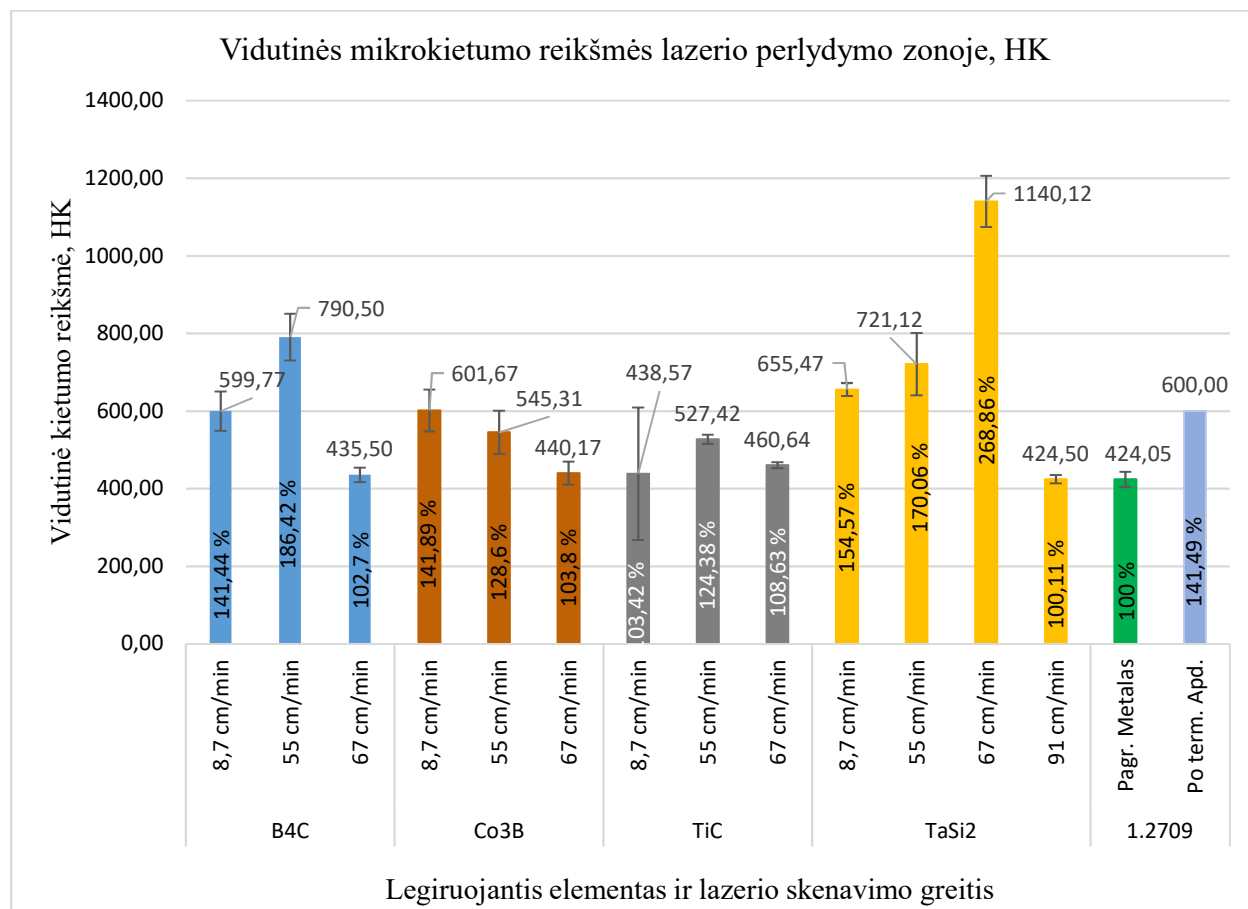
3.6 pav. SLM bandinio paviršiaus, legiruoto TaSi₂ priedais, mikrokietumo kitimo grafikas

Tiriant lazerinio legiravimo procesu apdirbtą bandinio paviršių, kai pridedamas TaSi₂ legiruojamasis priedas (3.6 pav.), geriausi paviršinių sluoksnių mikrokietumo pokyčiai nustatyti procesą atliekant 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Nustatytos paviršinių sluoksnių mikrokietumo verčių diapazonas perlydytoje zonoje yra nuo 1018 iki 1276 HK, iki 550 μm gylio, apdorojant šiuo režimu pasiektas geriausias martensitinio sendinamo plieno paviršiaus sukietinimo efektas.

Procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu taip pat pasiekti geri paviršiaus sukietinimo sluoksniai, pasiektų mikrokietumo verčių diapazonas yra nuo 487 iki 965 HK, iki 450 μm gylio. Procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu taip pasiektas naudingas paviršiaus sukietinimo efektas, nustatytos perlydytos zonos sluoksnio mikrokietumo vertės varijuoja nuo 643 iki 699 HK, iki 600 μm gylio. Lazerinį legiravimą atliekant 91 cm/min lazerio skenavimo greičiu, perlydytos zonos mikrokietumo vertės yra panašios į pagrindinio metalo mikrokietumą, todėl paviršinių sluoksnių sukietinimo efektas nedidelis.

Atlikus visų LSA proceso režimų mikrokietumo matavimo rezultatų sisteminimą, apskaičiuotos LSA proceso metu perlydytų SLM bandinio paviršinių sluoksnių vidutinės

mikrokietyumo vertės ir palygintos su lazeriu neapdoroto, ir tik termiškai apdoroto (sendinto) bandinio paviršiaus mikrokietyumo vertėmis (3.7 pav.).



3.7 pav. Vidutinių lazeriu apdorotų bandinių paviršių perlydymo zonoje nustatytų mikrokietyumo reikšmių palyginimo diagrama, procentinė išraiška

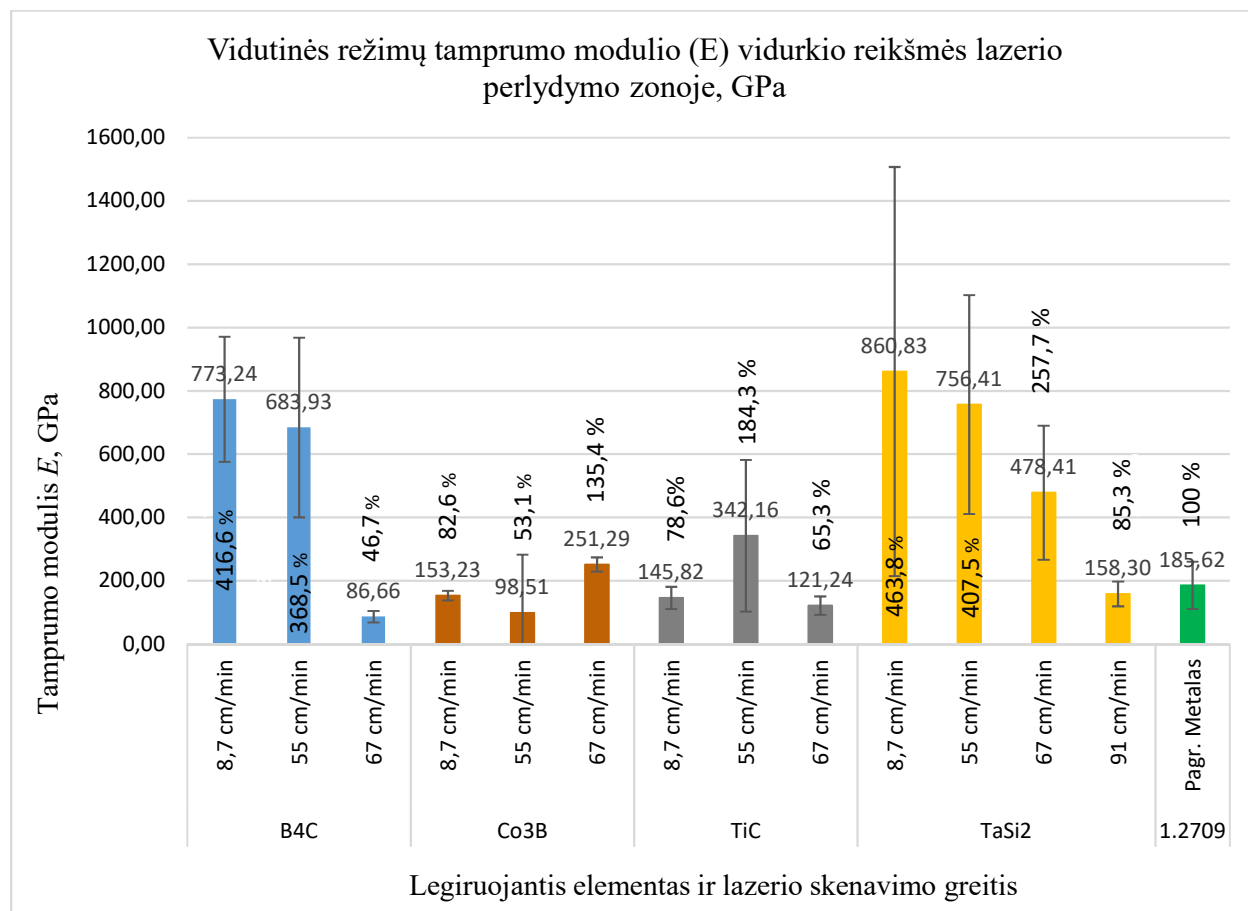
Iš šių stulpelinių diagramų galima matyti, kurie lazerinio legiravimo proceso režimai suteikė žymų paviršiaus sukietinimo efektą. Procesą atliekant su TaSi₂ legiruojamaisiais priedais 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu vidutinis perlydytos zonos mikrokietyumas yra apytiksliai 2,67 karto didesnis nei lazeriu neapdoroto SLM bandinio mikrokietyumas, taip pat tai apie 1,9 karto didesnis mikrokietyumas, negu pasiektas sendinant martensitinį sendinamą plieną. Legiruojant tuo pačiu priedu, 55 cm/min greičiu, lazeriu apdorotos zonos mikrokietyumas padidėjo apytiksliai 1,7 karto, o lazerinį legiravimą atliekant 8,7 cm/min greičiu, apdorotų paviršių vidutinis mikrokietyumas padidėjo 1,54 karto lyginant su lazeriu neapdorotu SLM bandiniu.

Ryškus paviršinių SLM bandinio sluoksnių suketinimas užfiksuotas, procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu legiruojuojant B₄C priedais, pasiektas vidutinis lazeriu apdorotos zonos mikrokietumas yra apytiksliai 1,86 karto didesnis nei lazeriu neapdoroto SLM bandinio.

Lazerinio legiravimo procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu ir naudojant B₄C; Co₃B; legiruojamuosius priedus, taip pat pasiektas SLM bandinio paviršių suketinimo efektas. Lazeriu apdorotų bandinio paviršių mikrokietumas yra apytiksliai 1,41 karto didesnis, lyginant su lazeriu neapdorotu SLM bandiniu.

3.3. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai

Naudojant B. R. Lawn ir V. R. Howes sukurta skaičiavimo metodiką, pagal Knopo bandymais nustatytas mikrokietumo reikšmės ir indentoriaus įspaudų įstrižainės, buvo apskaičiuoti lazeriu perlydytų zonų tamprumo modulio verčių vidurkiai ir palyginti su lazeriu neapdoroto SLM bandinio tamprumo moduli (3.8 pav.).



3.8 pav. Vidutinių lazeriu apdorotų SLM bandinių tamprumo modulio (E) lazerio perlydymo zonoje reikšmių stulpelinė diagrama

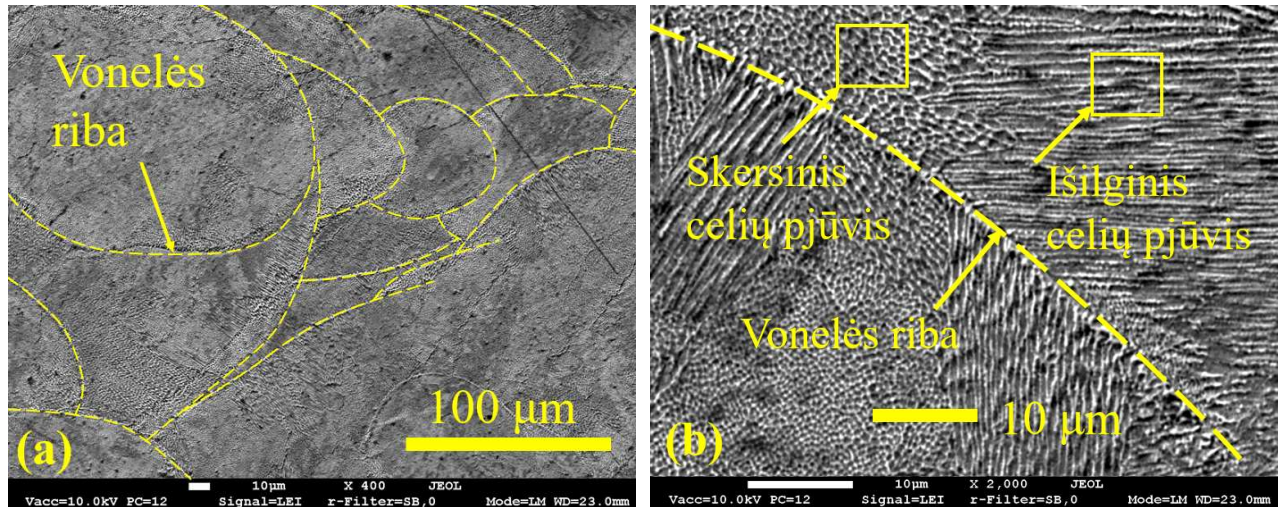
Iš šios stulpelinės diagramos, matome, kad didžiausi tamprumo modulio pokyčiai nustatyti lazeriu legiruotuose paviršiniuose sluoksniuose, kurie buvo legiruoti B_4C ir $TaSi_2$ priedais. LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, su šiais legiruojamaisiais priedais, vidutinės tamprumo modulio vertės padidėjo apytiksliai 4,17 ir 4,64 karto. Procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu, tamprumo modulis padidėjo apytiksliai 3,69 ir 4,07 karto. Taip pat žymus, apytiksliai 2,58 karto didesnis vidutinis tamprumo modulis nustatytas, LSA procesą atliekant 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, o naudojant $TaSi_2$ priedus ir LSA atliekant 55 cm/min greičiu nustatytas apytiksliai 1,84 karto didesnis tamprumo modulis.

Procesą atliekant 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, naudojant B_4C , Co_3B ir TiC priedus; 8,7 cm/min greičiu, naudojant Co_3B , TiC priedus; 55 cm/min greičiu, naudojant Co_3B ir 91 cm/min greičiu naudojant $TaSi_2$ legiruojančius priedus, nustatytas tamprumo modulio pokytis lyginant su lazeriu neapdoroto SLM bandinio tamprumo modulių yra nežymus.

3.4. Lazeriu apdoroto SLM bandinio paviršių mikrostruktūros analizė

SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno 1.2709 be legiruojamųjų priedų mikrostruktūra pateikta 3.9 pav. nuotraukoje (a) matosi, kad mikrostruktra susideda iš daug vienas su kitu susilydžiusių plieno mikrotūrių. Dar labiau padidintame vaizde, nuotraukoje (b), matosi, kad susilydžiusiuose plieno mikrotūriuose vyrauja celinė mikrostruktūra, celės išsidėsčiusios įvairiomis kryptimis, matomi skersiniai ir išilginiai celių pjūviai.

Celės kristalizuojasi epitaksiniu būdu, t.y. jos stengiasi atkartoti tą pačią struktūrinę orientaciją, jų augimas prasideda termiškai paveiktoje zonoje ir auga šiluminio (temperatūrinio) gradiento kitimo kryptimi (Kong et al., 2021). Kadangi susilydę mikrotūriai nėra taisyklingų formų, todėl ir matomi skersiniai ir išilginiai celių pjūviai.

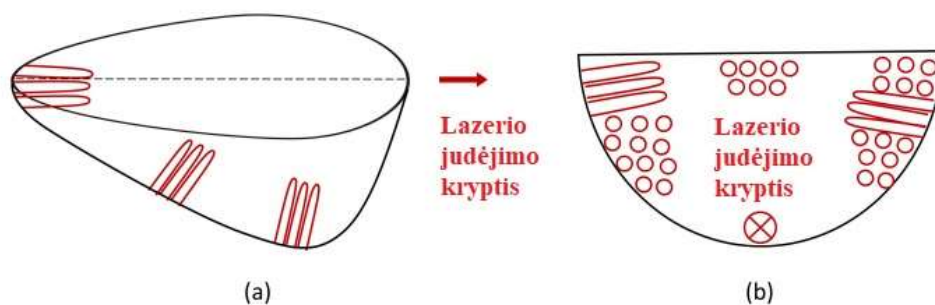


3.9 pav. SLM technologija pagaminto martensitinio sendinamo plieno 1.2709 mikrostruktūra

SLM technologija pagaminto bandinio lazeriu modifikuotų paviršių mikrostruktūros su B₄C legiruojamuoju priedu, kai LSA procesas atliktas esant vienodai lazerio spindulio galiai – 500 W, lazerio dėmės skersmeniui – 1,2 mm ir skirtingiems lazerio skenavimo greičiams: 8,7; 55; 67 ir 91 cm/min, pateiktos 3.2 lentelėje. Nuotraukų didinimas yra 50x.

Paviršiaus nuotraukoje, kurioje LSA vykdytas 91 cm/min skenavimo greičiu galima matyti labai didelius įtrūkimus, kurie tikėtina atsirado esant dideliame aušimo greičiui, todėl LSA procesui atlikti šis greitis yra perdidelis.

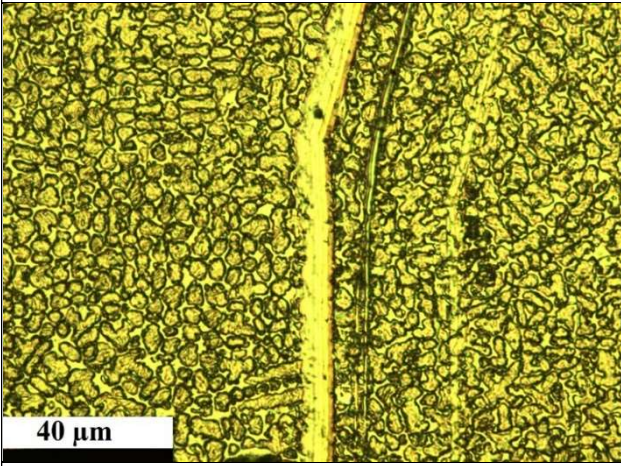
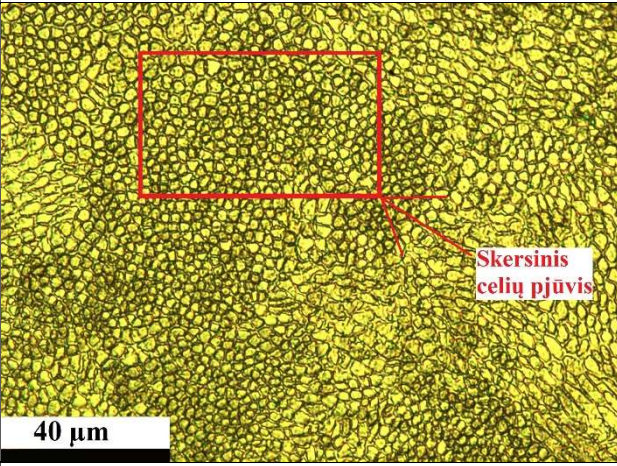
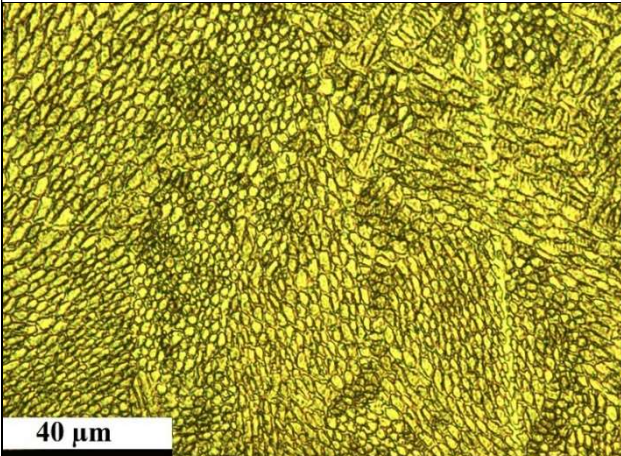
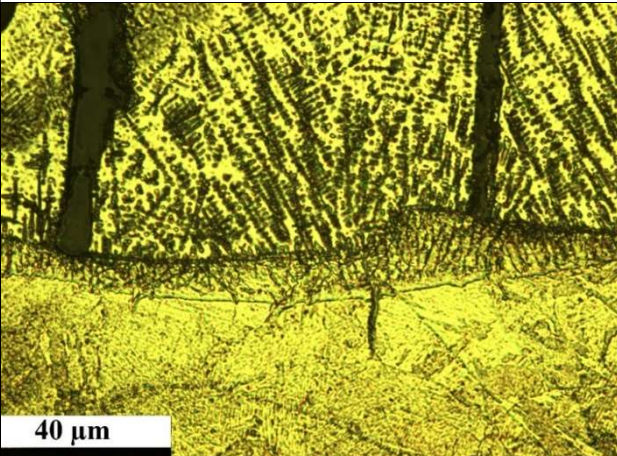
Iš nuotraukų taip pat galima matyti, kad taikant skirtingus LSA proceso režimus visas legiruojamasis priedas išsilydė ir visos fazės kristalizavosi iš lydalo. Didinant lazerio skenavimo greitį nuo 8,7 iki 91 cm/min susidarė skirtinga lazeriu legiruotų takelių mikrostruktūra. Visais atvejais susiformavo labai smulkūs dendritai, kuriuos sudaro celinė mikrostruktūra, celių augimo kryptis priklauso nuo šiluminio srauto krypties, t.y. nuo lazerio judėjimo krypties (3.10 pav.)



3.10 pav. Celinės struktūros formavimasis a) išilginiame pjūvyje; b) skersiniame pjūvyje (Karayagiz et al., 2020)

Kai LSA atliktas 8,7 cm/min greičiu, susiformavo stambesni, įvairių krypčių dendritai, nes celės juose dėl lėtesnio aušimo greičio augo įvairiomis kryptimis. LSA atlikus 55 ir 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, susidarė maždaug 2 kartus smulkesni dendritai su vienos krypties celine mikrostruktūra, mikroskopu padarytose nuotraukose matomi skersiniai šių celių pjūviai. Iš nuotraukų galima pastebėti, kad žemesniuose sluoksniuose celės augimas vyko vertikale kryptimi, o viršutiniuose sluoksniuose ši kryptis kinta ir krypsta į lazerio judėjimo kryptį, todėl yra matomi skersiniai šių celių pjūviai.

3.2 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su B₄C priedu skerspjūvių nuotraukos

Legiruojamasis priedas	B ₄ C
Lazerio skenavimo greitis	
8,7 cm/min	55 cm/min
	
67 cm/min	91 cm/min
	

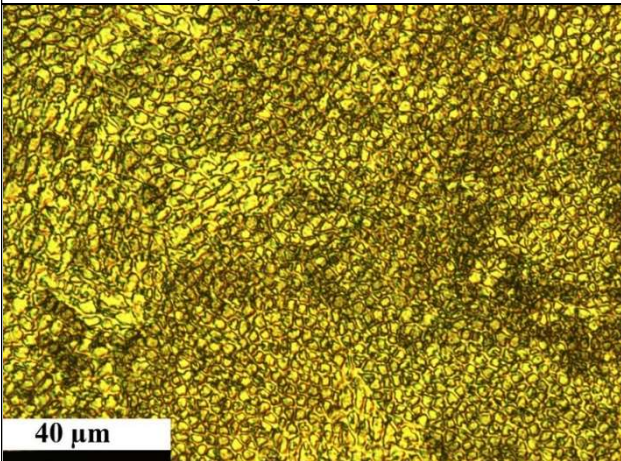
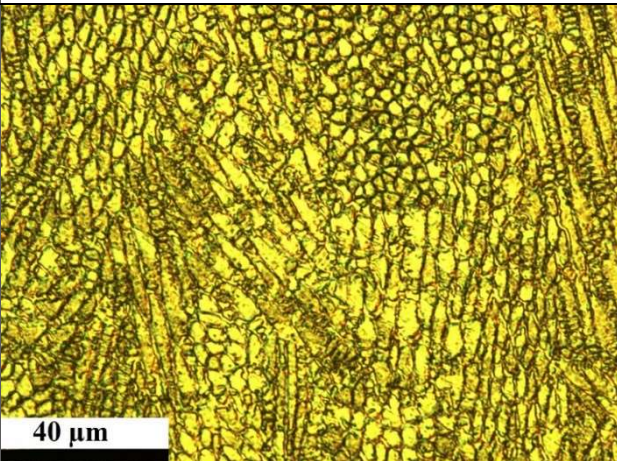
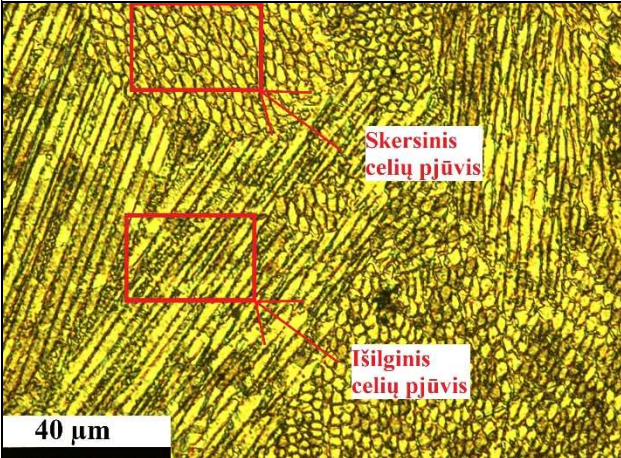
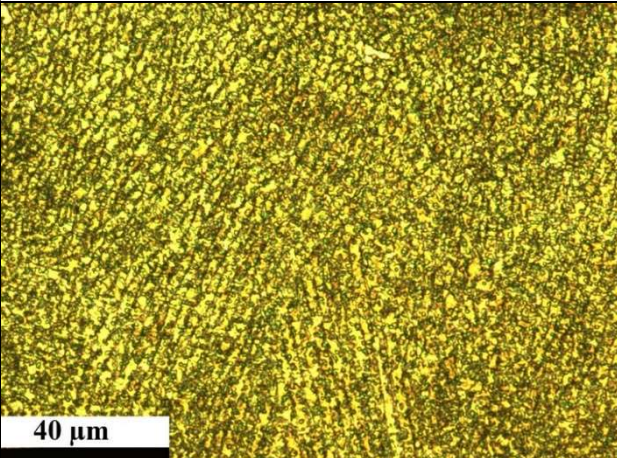
SLM technologija pagaminto bandinio lazeriu modifikuotų paviršių mikrostruktūros su Co₃B legiruojamuoju priedu, kai LSA procesas atliktas esant vienodai lazerio spindulio galiai –

500 W, lazerio dėmės skersmeniui – 1,2 mm ir skirtingiems lazerio skenavimo greičiams: 8,7; 55; 67 ir 91 cm/min, pateiktos 3.3 lentelėje. Nuotraukų didinimas yra 50x.

Iš nuotraukų galima matyti, kad taikant skirtingus LSA proceso režimus visas legiruojamasis priedas taip pat išsilydė ir visos fazės kristalizavosi iš lydalo. LSA atliekant skirtingais režimais, nuotraukose galima pastebėti, kaip kito lazeriu legiruoto sluoksnio mikrostruktūra.

LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, susiformavo smulkiadendritinė mikrostruktūra. LSA atliekant 55 ir 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, matomi įvairiomis kryptimis išsidėstę smulkūs dendritai, kuriuos sudaro celinė mikrostruktūra. Celės išsidėsčiusios įvairiomis kryptimis, tiek išilgai, tiek statmenai skersinio pjūvio vaizdo.

3.3 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su Co_3B priedu skerspjuvių nuotraukos

Legiruojamasis priedas	Co_3B
Lazerio skenavimo greitis	
8,7 cm/min	55 cm/min
	
67 cm/min	91 cm/min
	

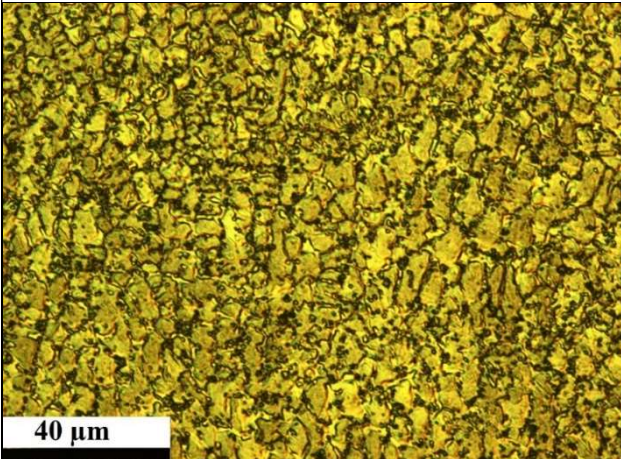
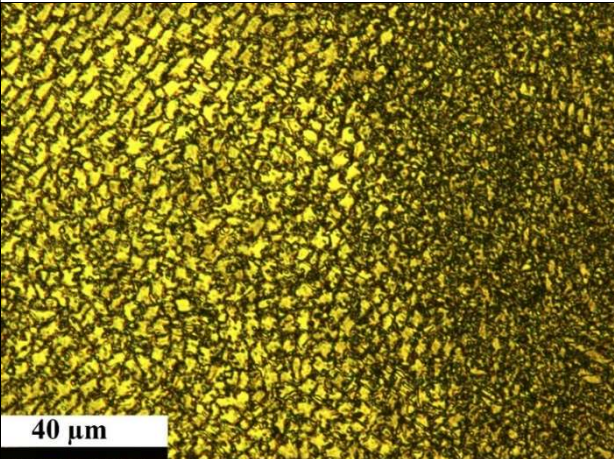
SLM technologija pagaminto bandinio lazeriu modifikuotų paviršių mikrostruktūros su TiC legiruojamuoju priedu, kai LSA procesas atliktas esant vienodai lazerio spindulio galiai – 500 W, lazerio dėmės skersmeniui – 1,2 mm ir skirtingiems lazerio skenavimo greičiams: 8,7; 55; 67 ir 91 cm/min, pateiktos 3.4 lentelėje. Nuotraukų didinimas yra 50x.

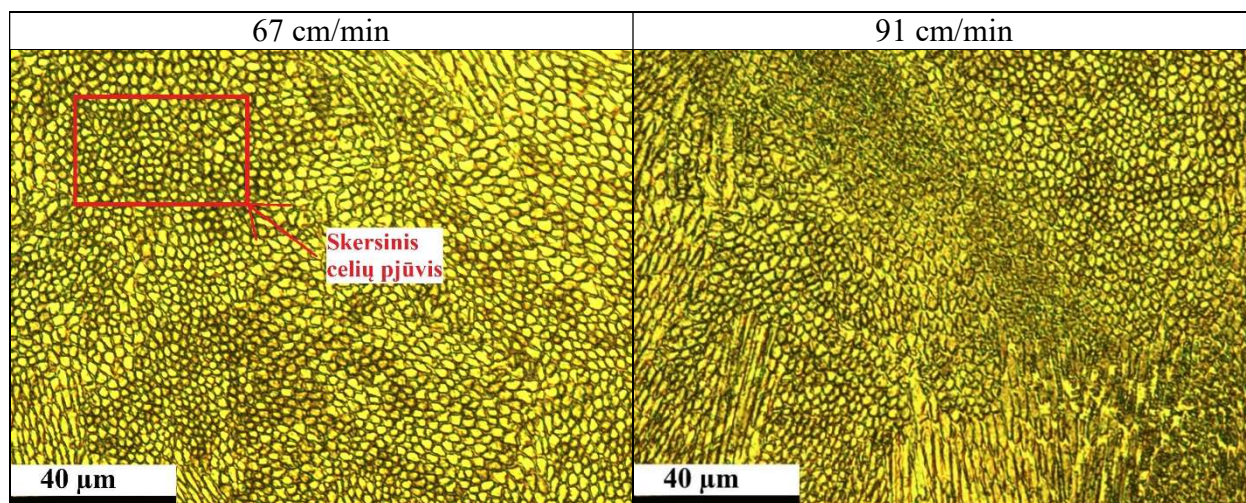
Iš mikrostruktūrų nuotraukų matyti, kad taikant skirtingus LSA proceso režimus kaip ir naudojant kitus legiruojamuosius priedus, visas TiC legiruojamasis priedas taip pat išsilydė ir visos fazės kristalizavosi iš lydalo. LSA atliekant skirtingais režimais, nuotraukose galima pastebėti, kaip kito lazeriu legiruoto sluoksnio mikrostruktūra.

LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, susiformavo smulki cilindrinės (stulpelinės) formos dendritinė mikrostruktūra. Šitokia struktūra susidarė dėl lėtesnio aušimo, šiluminio srauto kitimo greičio. LSA atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu susiformavo smulkesnė cilindrinės formos dendritinė mikrostruktūra. Kai LSA atliktas 67 cm/min ir 91 cm/min lazerio skenavimo greičiu, mikrostruktūrų nuotraukose matosi susiformavosi smulki celinė mikrostruktūra.

Tiek cilindrinės formos dendritinė tiek celinė lazeriu legiruotų paviršių mikrostruktūra orientuota lazerio judėjimo kryptimi.

3.4 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su TiC priedu skerspjūvių nuotraukos

Legiruojamasis priedas	TiC
Lazerio skenavimo greitis	
8,7 cm/min	55 cm/min
	



SLM technologija pagaminto bandinio lazeriu modifikuotų paviršių mikrostruktūros su TaSi₂ legiruojamuoju priedu, kai LSA procesas atliktas esant vienodai lazerio spindulio galiai – 500 W, lazerio dėmės skersmeniui – 1,2 mm ir skirtingiems lazerio skenavimo greičiams: 8,7; 55; 67 ir 91 cm/min, pateiktos 3.5 lentelėje. Nuotraukų didinimas yra 50x.

Iš mikrostruktūrų nuotraukų matyti, kad taikant skirtingus LSA proceso režimus kaip ir naudojant kitus legiruojamuosius priedus, visas TaSi₂ legiruojamasis priedas taip pat išsilydė ir visos fazės kristalizavosi iš lydalo. LSA atliekant skirtingais režimais, nuotraukose galima pastebėti, kaip kito lazeriu legiruoto sluoksnio mikrostruktūra.

LSA procesą atliekant 8,7 cm/min lazerio skenavimo greičiu, susiformavo smulki, nevienoda, įvairių dydžių cilindrinės (stulpelinės) formos dendritinė mikrostruktūra. Šitokia struktūra susidarė dėl lėtesnio aušimo, šiluminio srauto kitimo greičio.

LSA atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu susiformavo smulkesnė cilindrinės formos dendritinė mikrostruktūra. Taip pat matomas stambesnis, tikėtina, kad nepilnai išsilydęs TaSi₂ darinys.

Kai LSA atliktas 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, matoma įvairiomis kryptimis orientuota smulkiadendritinė mikrostruktūra. Šiuo režimu lazeriu legiruotas sluoksnis pasižymi labiausiai padidėjusiu paviršiaus mikrokietumu. Tikėtina, kad padidėjusį mikrokietumą nulemia naujai susiformavę dariniai.

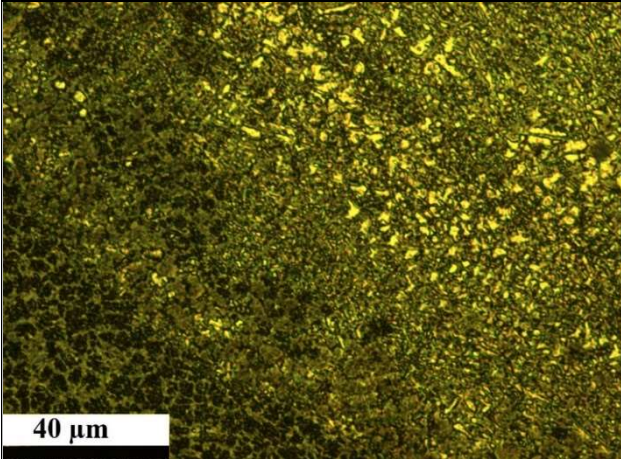
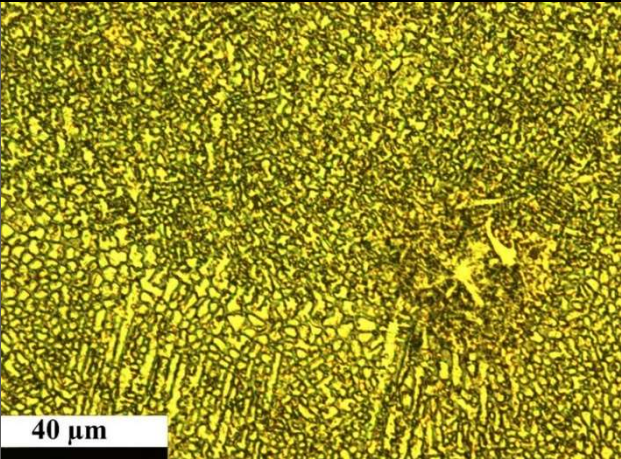
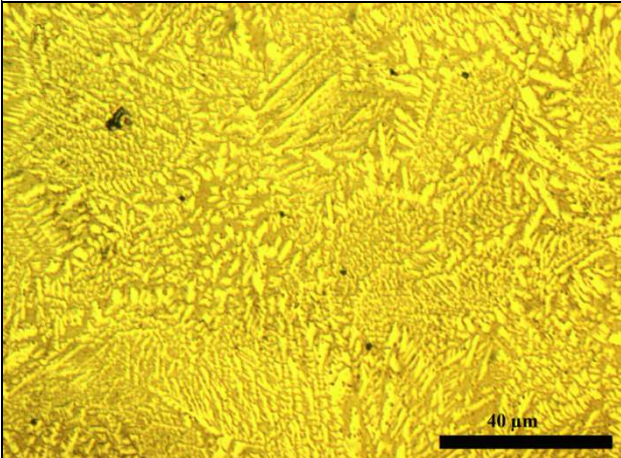
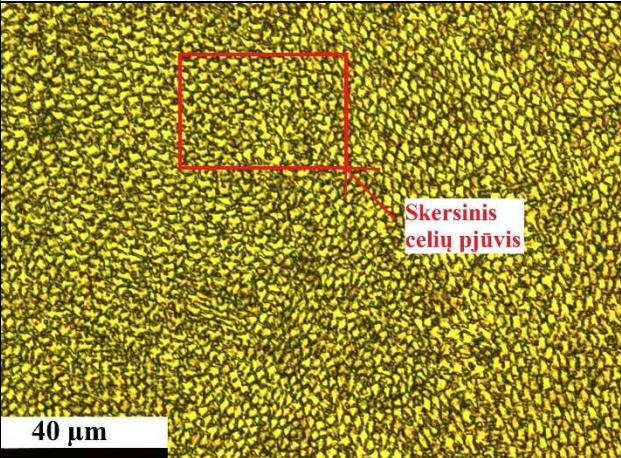
91 cm/min lazerio skenavimo greičiu, mikrostruktūrų nuotraukose matosi susiformavusi smulki celinė mikrostruktūra, orientuota lazerio judėjimo kryptimi.

Šitoks mikrostruktūrų skirtumas, LSA procesą atliekant skirtingu lazerio skenavimo greičiu, susidarė dėl to, kad didinant lazerio skenavimo greitį didėja legiruojamojo priedo

koncentracija, nes vyksta mažesnis lydalo susimaišymas. Skirtinga legiruojamojo priedo koncentracija taip pat nulemia ir skirtingas legiruoto sluoksnio savybes.

Visi LSA procesu modifikuoti takeliai buvo ėsdinami tomis pačiomis sąlygomis, tačiau matomas skirtingas išėsdinimas, tai taip pat pažymi, kad keičiantis lazerio skenavimo greičiui, susiformuoja skirtinga perlydyto sluoksnio mikrostruktūra.

3.5 lentelė. SLM bandinio paviršių, legiruotų skirtingais režimais su TaSi₂ priedu skerspjuvių nuotraukos.

Legiruojamasis priedas	TaSi ₂
Lazerio skenavimo greitis	
8,7 cm/min	55 cm/min
	
67 cm/min	91 cm/min
	

3.5. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Siekiant palyginti teorinius ir eksperimentinius rezultatus, apskaičiuotas visų eksperimentinių tyrimų metu gautų, vienodu lazerio skenavimo greičiu apdorotų takelių gylio ir pločio vidurkis. Šis vidurkis palygintas su teoriniu vidurkiu, apskaičiuotu taikant baigtinių elementų metodą. Palyginimo rezultatai pateikiami 3.6 lentelėje.

Palyginus teorines ir eksperimentais gautas vertes, nustatyta, kad mažiausias santykinis skirtumas arba rezultatų paklaida gauta matuojant lazeriu legiruotų sluoksnių gylio vertes, čia paklaida svyruoja nuo 4,38–18,02 %, mažiausias netikslumas apskaičiuotas procesą atliekant 91 cm/min ir 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu, atitinkamai 4,38% ir 5,36%.

Lyginant lazeriu legiruotų takelių pločio santykinį skirtumą, rezultatai tarp teorinių ir eksperimentais nustatytų pločio verčių skiriasi daugiau nei gylio. Čia santykinė paklaida svyruoja nuo 14,97 % iki 32,66 %. Mažiausia paklaida nustatyta procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu, o didžiausia 91 cm/min.

3.6 lentelė. Teorinių ir eksperimentinių geometrinių matmenų palyginimas

Lazerio skenavimo greitis cm/min	Gylis(vidurkis)		Plotis(vidurkis)		Skirtumas		Santykinis skirtumas, %	
	Teorinė vertė	Eksperimentinė vertė	Teorinė vertė	Eksperimentinė vertė	Gylio	Pločio	Gylio	Pločio
8,7	0,581	0,638	1,838	1,545	-0,057	0,293	9,81	15,94
55	0,399	0,446	1,749	1,267	-0,047	0,482	11,78	27,56
67	0,387	0,369	1,728	1,134	0,018	0,594	4,65	34,38
91	0,335	0,318	1,653	1,110	0,017	0,543	5,07	32,85

IŠVADOS

Šiame darbe, lazerinio legiravimo technologija pasiūlyta martensitinio sendinamo plieno 1.2709 detalėms, pagamintoms adytyviuoju būdu, paviršiaus kietumui padidinti. Taikant keturis skirtingus legiravimo priedus (Co_3B , B_4C , TiC ir TaSi_2) ir nuolatinės veikos CO_2 lazerį buvo atlikti lazerinio legiravimo eksperimentiniai tyrimai, esant pastoviai 500 W lazerio spindulio galiai ir 1,2 mm lazerio dėmės skersmeniui bei keičiant lazerio skenavimo greitį nuo 8,7 iki 91,0 cm/min ir užtikrinant apdorojimą lydymo režime. Legiruotų paviršių mikrostruktūrinės ir kietumo analizės rezultatai leidžia pateikti tokias išvadas:

1. Nustatyta, kad atliekant lazerinį legiravimą su visais legiruojamaisiais priedais (Co_3B , B_4C , TiC ir TaSi_2) vizualiai geriausios formos, be defektų legiruoti sluoksniai gauti procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Taikant 8,7 cm/min greitį, gauta labai įgaubta vonelė su TaSi_2 priedu ir įtrūkiai – su Co_3B , kas gali būti siejama su per dideliu šilumos įvedimu.
2. Taikant apibrėžtus lazerinio legiravimo parametrus, buvo suformuoti ~0,21–0,67 mm gylio ir ~0,88–2,22 mm pločio legiruoti takeliai. Naudojant TaSi_2 priedą, gauti giliausi ir siauriausi takeliai, naudojant TiC – mažiausio gylio ir plačiausi takeliai, su B_4C ir Co_3B priedais takelių gylis ir plotis buvo vidutinių dydžių, kas sietina su skirtingomis taikytų priedų fizikinėmis savybėmis.
3. Gautos legiruotų takelių gylio ir pločio priklausomybės nuo lazerio skenavimo greičio kiekvienam priedui, kurios parodė, kad: naudojant TaSi_2 priedą, yra stipri tiesinė gylio ir mažiau išreikšta pločio priklausomybės nuo lazerio greičio; TiC atveju – atvirkščiai; naudojant B_4C ir Co_3B priedus, ir gylis, ir plotis turi pakankamai išreikštą priklausomybę nuo lazerio skenavimo greičio.
4. Geriausias martensitinio sendinamo plieno SLM bandinių paviršių sukietinimo efektas pasiektas, lazerinio legiravimo procesą atliekant su TaSi_2 legiruojamuoju priedu, 67 cm/min lazerio skenavimo greičiu. Gautas kietumas (~1140 HK) yra ~2,7 karto didesnis už SLM bandinio medžiagos vidutinį mikrokietumą iki sendinimo (424 HK) ir ~1,9 karto didesnis už martensitinio sendinamo plieno kietumą po sendinimo (~600 HK).
5. Reikšmingas sukietinimo efektas buvo gautas taip pat taikant B_4C legiruojamąjį priedą ir lazerinio legiravimo procesą atliekant 55 cm/min lazerio skenavimo greičiu – mikrokietumo reikšmė padidėjo ~1,9 karto palyginus su nesendintu SLM bandiniu arba ~32 % palyginus su

kietumu po sendinimo ir siekė ~790 HK. Tačiau, bandiniuose, gautuose su B_4C priedu, buvo aptikti įtrūkiai, kas gali būti siejama su anglies koncentracijos padidėjimu, išsilydant B_4C dalelėms, ir trapių fazių susidarymu.

6. Taikant legiravimui Co_3B ir TiC priedus, legiruotų paviršių kietumas padidėjo palyginus su nesendintu SLM bandiniu, tačiau neviršijo martensitinio sendinamo plieno kietumo po sendinimo. Tikėtina, mažinant vonelės gylį ir, atitinkamai, didinant legiravimui skirtą priedo ir pagrindinio metalo susimaišymo santykį, galima būtų pasiekti didesnio sukietinimo efekto ir su šiais priedais.
7. Mikrostrukturne analize nustatyta, kad, taikant visus priedus ir visame taikytų lazerinio legiravimo parametrų intervale susiformavo labai smulki dendritinė/celinė mikrostruktūra; neišsilydžiusių legiravimui taikytų miltelių dalelių neaptikta. T. y. taikant darbe naudotus lazerinio apdorojimo režimus, visi naudoti legiruojamieji priedai visiškai išsilydė ir struktūra formavosi kristalizuojantis iš išlydytos būsenos. Didinant lazerio skenavimo greitį, mikrostruktūra smulkėjo.

Apibendrinimas ir rekomendacijos

- ✓ Naudojant legiravimui $TaSi_2$ priedą, pasiektas paviršiaus mikrokietumas didesnis negu termochemiškai įžotintų paviršių tipinis kietumas (~900 HV), tuo tarpu įtrūkių ar porų legiruotame sluoksnyje neaptikta. Tai leidžia manyti, kad lazerinis legiravimas su $TaSi_2$ priedu gali būti perspektyvus siekiant pagerinti martensitinių sendinamų plienų paviršiaus atsparumą dilimui ir tikslinga tęsti tyrimus, optimizuojant lazerinio apdorojimo parametrus.
- ✓ Tęsiant tyrimus su B_4C legiruojamuoju priedu, reikia atkreipti dėmesį į galimą anglies koncentracijos padidėjimą pagrindiniame metalo atveju, kai vyksta B_4C dalelių išsilydymas, kas gali padidinti legiruotų sluoksnių trapumą ir skatinti įtrūkių susidarymą. Tikslinga mažinti taikomą galios tankį ir siekti minimalaus B_4C dalelių išsilydymo.
- ✓ Tęsiant tyrimus su Co_3B ir TiC legiruojamaisiais priedais, tikslinga optimizuoti lazerinio apdorojimo parametrus, siekiant padidinti priedo ir pagrindinio metalo susimaišymo santykį; taip pat tikslinga siekti sumažinti priedų dalelių išsilydymo.
- ✓ Darbe atlikti skaitinio modeliavimo BE metodu eksperimentai naudojant modelius, verifikuotus anksčiau atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų pagrindu. Skaitinio modeliavimo rezultatai gerai sutapo su eksperimentiniais. Tai leidžia naudoti šiuos modelius tolimesniuose tyrimuose išlydytos vonelės geometriniais parametrais prognozuoti ir temperatūros pasiskirstymui tirti.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. *ADDITIVA Srl* [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.additivalab.com/materials/maraging-steel-1-2709>>.
2. Altos Photonics, Inc [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 17 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.findlight.net/lasers/solid-state-lasers/dpss/baltic-hp-1064-industrial-high-power-nanosecond-q-switched-dpss-laser>>
3. Adesina, O., Papoola, P., Fatoba, O. 2015. Laser Surface Modification – A Focus on the Wear Degradation of Titanium Alloy. *Intech Open Science. Chapter 16*: 367–381. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.5772/61737>>.
4. Anne, G., Vluegels, J., Van Der Biest, O. 2006. Ceramic-Matrix Composites. Microstructure, Properties and Applications. 22 – *Functionally graded ceramics*: 575–596. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1533/9781845691066.5.575>>.
5. Bamberger, M., Kaplan, W. D., Medres, B., Shepeleva, L. 1998. Calculation of process parameters for laser alloying and cladding. *Journal of Laser Applications 10*: 29–33 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 10 d.] Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.2351/1.521829>>.
6. Balachinaitė, O., Bargelis, A., Dementjev, A., Jonušas, R., Račiukaitis, G., Sirutkaitis, V. 2008. *Lazerinė technologija*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla. 353 psl.
7. Baucio, M. 1994. *ASM Engineered Materials Reference Book*. Materials Park, OH: ASM International. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2022 balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=058d1b70edbd4b2293f298c52bbf9818>.
8. Bepari, M.M.A. 2017. *Comprehensive Materials Finishing || 2.3 Carburizing: A Method of Case Hardening of Steel*. 71–106 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 kovo 28 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09187-6>>.
9. Bodziak, S., Al-Rubaie, K. S., Valentina, L. D., Lafratta, F. H., Santos, E. C., Zannattam, A. M., Chen, Y. 2019. Precipitation in 300 grade maraging steel built by selective laser melting: Aging at 510 °C for 2 h. *Materials Characterization*, 151: 73–83. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2022 balandžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.02.033>>.
10. Bremen, S., Meiners, Dr. W., Diatlov, A. 2012. Selective Laser Melting: A manufacturing technology for the future? *Rapid Manufacturing 9(2)*: 33–38. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1002/latj.201290018>>.
11. Cajner, F., Landek, D., Leskovšek, V. 2009. Surface modifications of maraging steels used in the manufacture of moulds and dies. *Materials and technology 44*: 85–91.

- [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 kovo 27 d.]. Prieiga per internetą: <<http://mit.imt.si/izvodi/mit102/cajner.pdf>>.
12. Campos-Silva, I. E., Rodriguez-Castro, G.A. 2015. 18 – Boriding to improve mechanical properties and corrosion resistance of steels. *Thermochemical Surface Engineering of Steels. Improving Materials Performance*: 651–702 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 6 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1533/9780857096524.5.651>>.
 13. Chen, J., Zhang, X., Li, D., Liu, C., Ma, H., Ying, C., Wang, F. 2019. Insight into the vacancy effects on mechanical and electronic properties of Tantalum Silicide. *Ceramics International Vol. 46, Issue 4*: 4595–4601. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.189>>.
 14. Grasso, S., Hu, C., Vasylykiv, O., S. Suzuki, T., Guo, S., Nishimura, T., Sakka, Y. 2011. High-hardness B₄C textured by a strong magnetic field technique. *Scripta Materialia 64*: 256–259. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.10.010>>.
 15. Gokuldoss, P. K., Kolla, S., Eckert, J. 2017. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Blinder Jetting – Selection Guidelines. *Materials 2017 Volume 10 (6)*: 672. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.3390/ma10060672>>.
 16. Hällgren, S., Pejryd, L., Ekengren, J. 2016. Additive Manufacturing and High Speed Machining – cost Comparison of short Lead Time Manufacturing Methods. *Procedia CIRP 50*: 384–389. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.049>>.
 17. Hong, Y., Dong, D. D., Lin, S. S., Wang, W., Tang, C. M., Kuang, T. C., Dai, M.J. 2021. Improving surface mechanical properties of the selective laser melted 18Ni300 maraging steel via plasma nitriding. *Surface & Coatings Technology*, 406, 126675. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126675>>.
 18. Hussain, A., Akhter, R., Farooq, W.A., Aslam, M. 2010. Laser Surface Alloying of Ni-Co Electroplated Low Carbon Steel. *Key Engineering Materials Vol. 442*: 137–143. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.442.137>>.
 19. Yadroitsev, I., Smurov, I. 2010. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia 5*: 551–560. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.083>>.
 20. Yadroitsev, I., Thivillon, L., Bertrand, Ph., Smurov, I. 2007. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied Surface Science 254 (4)*: 980–983. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.046>>.

21. Yamaguchi, T., Hagino, H. 2018. Formation of titanium-carbide dispersed hard coating on austenitic stainless steel by laser alloying with a light-transmitting resin. *Vacuum* 155: 23–28. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2022 balandžio 15 d.] Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.050>>.
22. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman R., Rab, S. 2021. Role of Additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research Vol. 4*: 312–322. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>>.
23. Jägle, E. A., Choi P. P., Humbeeck, J. V., Raabe, D. 2014. Precipitation and austenite reversion behavior of a maraging steel produced by selective laser melting. *Journal of Materials Research*. 29 (17): 2072–2079. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2022 balandžio 11 d.] Prieiga per internetą: <[doi:10.1557/jmr.2014.204](https://doi.org/10.1557/jmr.2014.204)>.
24. Juodelis, V., Benediktas, J., Valiulis, A. V., 2004. *Metalotyros pagrindai*. Vilnius: Technika 158 psl.
25. Karayagiz, K., Johnson, L., Seede, R., Attari, V., Zhang B., Huang, X., Ghosh, S., Duong, T., Karaman, I., Elwany, A., Arroyave, R. 2020. Finite Interface Dissipation Phase Field Modeling of Ni-Nb under Additive Manufacturing Conditions. *Acta Materialia* 185: 320–339. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.11.057>>.
26. Karayel, E., Bozkurt, Y. 2020. Additive manufacturing method and different welding applications. *Journal of Materials Research and Technology* 9 (5): 11424–11438. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.039>>.
27. Kenzari, S., Bonina, D., Dubois, J. M., Fournée, V. 2012. Quasicrystal-polymer composites for selective laser sintering technology. *Materials and Design* 35: 691–695. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.032>>.
28. Kong, D., Dong, C., Wei, S., Ni, X., Zhang, L., Li, R., Wang, L., Man, C., Li, X. 2021. Abou metastable cellular structure in additively manufactured austenitic stainless steels. *Additive manufacturing* 38: 101804. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101804>>.
29. Kulikauskas, L., 1997. *MEDŽIAGOTYRA. Konstrukcinės medžiagos*, Vilnius: Žara, 511 psl.
30. Kusinski, J., Kac, S., Kopia, A., Radziszewska, A., Rozmus-Gornikowska, M., Major, B., Marczak, J., Lisiecki, A. 2012. Laser modification of the materials surface layer – a review paper. *Bulleting of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 60 No. 4*: 711–728. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <[doi:10.2478/v10175-012-0083-9](https://doi.org/10.2478/v10175-012-0083-9)>.

31. Lawrence, J., 2008. *Advances in laser materials processing. Technology, Research and Applications. (Second edition)*. Coventry, UK: Woodhead Publishing, Elsevier Ltd.
32. Lawn, B. R., Howes, V. R. 1981. Elastic recovery at hardness indentations. *Journal of Materials Science* 16: 2745–2752. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2022 balandžio 9 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1007/BF00552957>>.
33. Lekurwale, S., Karanwad, T., Banerjee, B. 2022. Selective laser sintering (SLS) of 3D printlets using a 3D printer comprised of IR/red-diode laser. *Annals of 3D Printed Medicine. Volume 6, 100054*. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100054>>.
34. Martinez-Hernández, A., Méndez-Albores, A., Arciga-Durna, E., Flores, J. G., Pérez-Bueno, J., Meas, Y., Trejo, G. 2018. Effect of heat treatment on the hardness and wear resistance of electrodeposited Co-B alloy coatings. *Journal of Materials Research and Technology* 450: 960–968. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.007>>.
35. Mattox D. M. 2010. Chapter 1 – Introduction. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)*: 1–24 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 8 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00001-0>>.
36. Schaaf, P., Kaspar, J., Höche, D., 2014. *Comprehensive Materials Processing || 9.13 – Laser Gas – Assisted Nitriding of Ti Alloys*. 261–278 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 kovo 29 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00912-2>>.
37. Selg, H., Meka, S.R., Kachel, R.E., Schacherl, R.E., Waldenmaier, T., Mittemeijer, E.J. 2013. Nitriding behaviour of maraging steel: experiments and modelling. *Mater Sci Vol. 48*: 4321–4335. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1007/s10853-013-7248-2>>.
38. Perry, D. L. 2011. *Handbook of INORGANIC COMPOUNDS*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 129 psl.
39. Prashanth, K. G. 2020. Selective Laser Melting: Materials and Applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4 (1): 13–16. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>>.
40. Sciti, D., Silvestroni, L., Celotti, G., Melandri, C., Guicciardi, S. 2008 Sintering and Mechanical Properties of ZrB₂-TaSi₂ and HfB₂-TaSi₂ Ceramic Composites. *The American Ceramic Society* 91: 3285–3291. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02593.x>>.
41. Sokeng, T. I., Ngom, B.D., Cummings, F., Kotsedi, L., Msimanga, M., Maaza, M., Van Zyl, R.R. 2015. Proton-induced nanorod melting in a coating obtained from the pulsed laser ablation of W₂B₅/B₄C. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 344:70–75. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.12.021>>.

42. *PROTOLABS Ltd* [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.protolabs.co.uk/materials/comparison-guide/?category=metal>>.
43. Valiulis A. V., 2007. *Legiruotieji plienai ir jų suvirinimas*, Vilnius: „Technika“, 248 psl.
44. Winter, K. M., Kalucki, J., Koshel, D. 2015. Process technologies for thermochemical surface engineering. *Thermochemical Surface Engineering of Steels. Improving Materials Performance*: 141–206. [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1533/9780857096524.1.141>>.
45. Wu, Y.Q., Yan, M.F., 2011. Plasticity characterization of the modified layer produced by plasma nitrocarburizing of nanocrystallized 18Ni maraging steel. *Vacuum* 86: 119–123 [Interaktyvus], [žiūrėta 2022 balandžio 6 d.]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.04.021>>.