



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Justinas Storta

**APLINKOS IR SISTEMOS VIDINIŲ TEMPERATŪRINIŲ TRIKDŽIŲ
ĮTAKA LAZERINIAM RASTRINIŲ STRUKTŪRŲ FORMAVIMO
TIKSLUMUI**

**FORMING ACCURACY OF RASTER STRUCTURES BY LASER UNDER
THE THERMAL INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT AND THE
SYSTEM INTERNAL DISTURBANCES**

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Pramonės inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Aplinkos ir sistemos vidinių temperatūrinių trikdžių įtaka lazeriniam rastrinių struktūrų formavimo tikslumui**

Autorius **Justinas Storta**

Vadovas **Albinas Kasparaitis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Darbe nagrinėjama precizinių metrologinių skalių formavimo metu susiformuojančių vidinių ir išorinių temperatūros gradientų reikšmių įtaka į rastrų tarpusavio padėtį naudojant naują lazerinę rastrų formavimo įrangą. Apžvelgiami temperatūros laukų ir temperatūros deformacijų modeliavimo ir matavimo metodai bei priemonės, lazerinio apdirbimo technologijos ypatumai, sudarytas raistro formavimo temperatūros laukų modeliavimo modelis, pasirinkta vidinių ir išorinių temperatūros gradientų tyrimo metodika ir įranga. Pasinaudojant specialia įranga atlikti vidinių ir išorinių temperatūros gradientų tyrimai, kuomet lazeris veikia trumpą juostos plotą ir kuomet jutikliai yra montuojami įvairiuose įrenginio taškuose. Abiejų eksperimentinių tyrimų rezultatai statistiškai apdoroti, pateikti grafiškai remiantis eksperimentiniais tyrimais, apibendrinti ir padarytos reikiamos išvados. Apibendrinus visus gautus rezultatus ir sudarius empirinę formulę suskaičiuojama terminės paklaidos dydis, kuris teikiamas, kaip rekomendacija temperatūros kalibravimo paklaidoms mažinti.

Darbo apimtis – 77 p. teksto be priedų, 63 iliustracijos, 43 bibliografinis šaltinis. Atskirai pridedami darbo priedai

Prasminiai žodžiai: Kompensacija, lazerinis rastrų formavimas, paklaidos, skalė, vidiniai ir išoriniai temperatūros gradientai.

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechanical Engineering	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Industrial Engineering study programme Master Graduation Thesis 4	
Title Forming Accuracy of Raster Structures by Laser Under the Thermal Influence of the Environment and the System Internal Disturbances	
Author Justinas Storta	
Academic supervisor Albinas Kasparaitis	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The paper examines internal and external temperature gradients values influence to the raster relative position on metrological precision scale using a new laser raster forming equipment. An overview of temperature fields and temperature deformation modeling, measurement techniques and tools, laser processing technology features is made, was created raster forming temperature field simulation model, selected internal and external temperature gradients research methods and equipment. Using a special investigation equipment to carry out internal and external temperature gradients formation when laser operates short stainless steel stripe segment and when the sensors are mounted at various points of the device. Both experimental results are statistically processed, presented graphically on the basis of experimental studies, summarized and made the required findings. Summarizing all the results and conclusion of the empirical formula counted thermal margin of error, which is given as a recommendation to reduce the temperature. Thesis consist of: 77 p. text without appendixes, 63 pictures, 43 bibliographical entries. Appendixes included	
Keywords: Compensation, errors, internal and external temperature gradients, laser raster formation, scale.	

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS.....	11
1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS.....	14
1.1. Problemos apibūdinimas.....	14
1.2. Temperatūros laukų ir temperatūros deformacijų modeliavimo metodų apžvalga.....	14
1.3. Temperatūros gradientų matavimo metodų ir priemonių apžvalga	16
1.4. Lazerinio apdirbimo technologijos ypatumai	24
1.5. Tyrimo užduoties formulavimas	29
2. TEMPERATŪROS LAUKŲ MODELIAVIMAS.....	30
2.1. Temperatūros laukų formavimo modelio sudarymas	30
2.2. Skaičiavimo duomenų paruošimas	33
2.3. Skaičiavimas pagal modelius, rezultatai	35
3. ĮRENGINIO VIDINIŲ IR IŠORINIŲ TRIKDŽIŲ SUKELIAMŲ TEMPERATŪROS GRADIENTŲ TYRIMAS.....	40
3.1. Tyrimo uždaviniai ir metodai	40
3.2. Vidinių trikdžių tyrimo planas bei aparatūra	40
3.3. Eksperimentiniai vidinių temperatūros gradiento trikdžių tyrimai	46
3.4. Išorinių trikdžių tyrimo eiga bei aparatūra.....	58
3.5. Eksperimentiniai išorinių temperatūros gradiento trikdžių tyrimai	61
4. TEMPERATŪROS PAKLAIDŲ TYRIMAS, KOMPENSACIJA	67
4.1. Temperatūros paklaidų tyrimo metodika	67
4.2. Temperatūros paklaidų kompensacija	69
IŠVADOS	71
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	74
PRIEDAI	77

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Temperatūros gradientas.....	18
1.2 pav. Bimetalinis termometras	20
1.3 pav. Termorezistoriniai jutikliai: A) Apvyniotas; B) Plonasluoksnis	21
1.4 pav. Neigiamo temperatūros koeficiento termistoriai	21
1.5 pav. Termoporos schema.....	22
1.6 pav. Termoporų temperatūros charakteristikos, priklausomai nuo įtampos.....	22
1.7 pav. Absoliučiai juodo kūno spinduliavimas.....	24
1.8 pav. Lazerio spindulio sąveika su medžiaga	25
1.9 pav. Daugkartiniai atspindžiai esant kartoavimo režimui	25
1.10 pav. Skirtingų lazerių sąveika su medžiaga.....	26
1.11 pav. Ilgo impulso sąveika su medžiaga	27
1.12 pav. Ultra greito impulso sąveika su medžiaga	28
1.13 pav. Formavimo pavyzdžiai naudojant skirtingus lazerius: kairėje – nano, dešinėje femto sekundinis lazeris.....	28
2.1 pav. Normalinis galios tankio pasiskirstymas lazerinės spinduliuotės dėmėje	31
2.2 pav. a) Temperatūros pasiskirstymas, pagal 2.11 formulę, veikiant judančiam taškiniam šaltiniui; b) Judėjimo trajektorijos atvaizdavimas	32
2.3 pav. a) Izotermos ir temperatūros pasiskirstymas veikiant judančiam taškiniam šaltiniui; b) Judėjimo trajektorijos atvaizdavimas	33
2.4 pav. Juostelės modelis	35
2.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas rastro formavimo metu ir po jo	36
2.6 pav. Paviršiaus temperatūra režio centre skirtingais laiko momentais: $0,1 \div 2 \text{ ms}$. Vyksta formavimas	37
2.7 pav. Paviršiaus temperatūra režio centre skirtingais laiko momentais: $2,1 \div 3,99 \text{ ms}$. Vyksta aušinimas	37
2.8 pav. Segmento skerspjūvio temperatūros lauko grafikai: a) z x plokštumoje; toliau visi kiti z y plokštumoje, tik skirtingose x padėtyse: b) 1,8 mm, c) 5 mm, d) 10 mm, e) 15 mm, f) 18 mm	38
2.9 pav. Natūralia oro konvekcija aušinamos liniuotės kaitinimo dinamikos temperatūros profiliai: a) 3D temperatūros profilis; b) 2D temperatūros profilis; c) 1D temperatūros profilis x kryptimis; d) 1D temperatūros profilis y kryptimis. Grafikuose nurodytas 0°C yra lygus 20°C	39
3.1 pav. 40 μm rastro formavimo schema.....	41
3.2 pav. 20 μm rastro formavimo schema.....	41
3.3 pav. Temperatūros tyrimams naudojama duomenų rinkimo ir kaupimo schema	42
3.4 pav. „USB4-D“ V8 programos langas.....	42
3.5 pav. „USB4-D“ duomenų surinkimo įrenginys	43
3.6 pav. LM324 sumontuota ant montažinės plokštės.....	43
3.7 pav. LM324 bendras vaizdas ir vidinė schema.....	44
3.8 pav. Temperatūrinis imtuvas LKM 223	44
3.9 pav. Platininis PT100 temperatūros jutiklis.....	45
3.10 pav. Lazerio spindulio poveikio ruošinio temperatūros pokyčiui tyrimo stendo schema	46
3.11 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo standas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras. Jutikliai su tarpeliu	46
3.12 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrą, jutikliai viršuje	47

3.13 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras	48
3.14 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrą, jutikliai viršuje, jų padėtis perstumta	48
3.15 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastras, jutikliai viršuje	49
3.16 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastras, pakeistas ruošinys.....	49
3.17 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras, juostelė apversta	50
3.18 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastras, jutikliai apačioje.....	50
3.19 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras	51
3.20 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrus, jutikliai viršuje	52
3.21 pav. 3.20 paveiksle pateikto bandymo temperatūros nusistovėjimas iki pradinės 22,9 – 23 °C temperatūros	52
3.22 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant foną, jutikliai viršuje	53
3.23 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastrus, jutikliai viršuje	54
3.24 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 20 μm rastras	55
3.25 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastrus, jutikliai apačioje.....	55
3.26 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant foną, jutikliai apačioje ..	56
3.27 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrus, jutikliai apačioje.....	57
3.28 pav. 3.27 paveiksle pateikto bandymo temperatūros nusistovėjimas iki pradinės 23,3 – 23,4 °C temperatūros	58
3.29 pav. Jutiklių išdėstymo schema rastrų formavimo įrenginio plote.....	58
3.30 pav. Temperatūros matuoklis PP2 (eksperimento metu užpildomos visos 24 jungtys) bei programos langas – viršuje	60
3.31 pav. Jutiklis EN 60 751	61
3.32 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymai prieš ir įjungiant įrenginį.....	62
3.33 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymai prieš ir įjungiant įrenginį, be 13,15,16 jutiklių.....	62
3.34 pav. Rastrų formavimo įrenginio realus vaizdas, nurodant didžiausius šilumos šaltinius	63
3.35 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros nusistovėjimas visame įrenginio ilgyje. Pradinis, tarpinis ir nusistovėjęs įrenginio režimas	63
3.36 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus.....	64
3.37 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus – atskirai be 13, 15, 16 jutiklių.....	64
3.38 pav. Rastrų formavimo įrenginio pakartotinis temperatūros nusistovėjimas visame įrenginio ilgyje	65

3.39 pav. Temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus naudojant tik 5, 6, 7, 8 ir 17 jutikliai ...	66
4.1 pav. Lazerio spindulio ir CCD mikroskopų padėties atstumai	68
4.2 pav. Juostos skerspjūvio vidutinio temperatūros gradiento pasiskirstymas tarp M1 ir M2 esant lazerio ir aplinkos įtakai	69

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Lazerio parametrai	33
2.2 lentelė. Juostelės medžiagos parametrai	34
3.1 lentelė. Lazerio judesio greičio ir laiko parametrai	41
3.2 lentelė. Kvadratūrinio operacinio stiprintuvo LM324 charakteristikos.....	43
3.3 lentelė. Temperatūros imtuvo LKM 223 charakteristikos.....	44
3.4 lentelė. Platininio PT100 temperatūros jutiklio charakteristikos.....	45
3.5 lentelė. Jutiklio EN 60 751 charakteristikos.....	61

IVADAS

Ištobulėjusi ir nusistovėjusi metrologinių skalių gamyba fotolitografiniu būdu ant stiklo turi nemažai privalumų: stiklo ruošiniai nesudėtingai apdorojami; temperatūros aspektu stabilios; pagrindas nesioksiduoja; galima formuoti aukštos kokybės, skirtingų formų rastrines struktūras; informacijai apdoroti gali būti panaudojami skirtingi būdai: atspindžio arba praeinamos šviesos (*Scales and gratings*). Tačiau stiklinės skalės turi ir nemažai trūkumų: ribotas skalės ilgis, maksimaliai 3,5–4 metro; trapumas; reikalinga speciali, stabilios temperatūros aplinka, izoliuota nuo išorės neigiamo poveikio, o tai labai padidina gamybos kaštus; naudojami aplinkai kenksmingi cheminiai produktai; ilgas formavimo procesas; ribotas kopijavimo skaičius nuo pagrindinės matricos.

Tam, kad būtų sumažinta gamybos kaina, bet išlaikyta aukšta kokybė, yra diegiama nauja rastrų formavimo technologija, kurios esmė yra lazeriu formuoti rastrus ant metalinės juostos. Tai leidžia pašalinti nemažai su fotolitografija susijusių trūkumų. Naujai gaminamos skalės ilgis gali siekti 5 m, 10 m, kai kuriais atvejais net iki 28 metrų, pavyzdžiui „Heidenhain“ LC 200 serijos; gaunama netrapi juosta; minimalus cheminių komponentų panaudojimas, daugiausia naudojama valyti skalę; trumpas formavimo laikas; nereikalinga kopijavimo matrica. Bet, kad ir koks geras būtų metodas, jis turi ir trūkumų. Šie trūkumai daugiausia kyla dėl to, kad metalinė skalė apdirbimo metu pradeda deformuotis dėl lazerio ir rastrų formavimo įrenginio elementų, toliau aplinkos, šiluminio veikimo.

Įmonėje „Precizika Metrology“ toks rastrų formavimo įrenginys yra kuriamas. Pasaulinėje rinkoje yra tik kelios įmonės, kurios turi tokią skalių gamybos technologiją ir kurios laikosi aukštų kokybės standartų. Tokios kompanijos kaip „Renishaw“ ir „Heidenhain“ turi panašiomis technologijomis veikiančius formavimo įrenginius, tačiau dėl komercinių tikslų gamybos paslaptys yra neatskleidžiamos arba paviešinama tik labai maža dalis. Panašumų galima rasti tokiuose patentuose, kaip: US 8466943 B2 (Ellin, Henshaw *et al.* 2013), US 7903336 B2 (Pelsue 2011), US 5632916 A (Lappalainen *et al.* 1997), US 7085057 B2 (Raymond 2006) bei US 6777645 B2 (Ehrmann *et al.* 2004). Todėl visas įrenginio konstravimas susiduria su daug nežinomųjų. Vieni spėjimai būna tikslūs, kiti ne ir reikalauja papildomų tyrimų. Visa konstrukcija susideda iš labai daug tarpusavyje sujungtų elementų, kurie sąlygoja tarpusavio veikimą.

Tyrimo objektas

Dėl atsirandančių temperatūros gradientų apdirbimo metu vyksta juostos deformacijos – susitraukimai ir pailgėjimai, dėl kurių susiformuoja netinkamas rastrų išsidėstymas. Tyrimo objektu yra laikomi rastrų formavimo metu dėl šilumos šaltinių poveikio t. y. lazerio ir aplinkos, susiformuojantys temperatūros gradientai bei laukai ir temperatūros deformacijos bei paklaidos,

kurių pasiskirstymą norima išsiaiškinti formuojant rastrus ant „Westig“ 1.4028 Mo poliruotos nerūdijančio plieno juostos. Naudojamas precizinis rastrų formavimo įrenginys, kurio pagrindines dalis sudaro: judantis lazeris, mikroskopai, aušintuvai, tempimo ir įtempimo elementai, mechatroniniai įrenginio junginiai.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Lazeris ir įrenginio elementai yra vieni iš pagrindinių šilumos bei deformacijos sukėlėjų, paveikiantys ploną poliruotą metalinę juostą. Rastrų formavimas atliekamas termokonstacinėje patalpoje, kurioje palaikoma pastovi, įmonės reglamentuose nustatyta temperatūra.

Darbo tikslas yra nustatyti, kaip pasiskirsto temperatūros gradientai lazeriniu rastrų formavimo metu juostoje, visame įrenginio ilgyje, kuomet sistema yra veikimo režime, bei atlikti modeliavimą, kad atskleistume, kokio dydžio temperatūros yra rastro formavimo metu bei grafiškai pavaizduoti gradientų pasiskirstymą, kadangi tai turės įtakos galutinei produkto kokybei.

Tam, kad tikslas būtų įgyvendintas, yra iškeliami tokie uždaviniai:

1. Atlikti temperatūros gradientų modeliavimo ir matavimo metodų, taip pat tyrimų ir priemonių apžvalgą.
2. Sudaryti ir atlikti lazerinio rastrų formavimo modeliavimą, kurį naudodami nustatysime temperatūros gradientų pasiskirstymą nedidelėje rastrų formavimo zonoje.
3. Sudaryti ir atlikti eksperimentus, kuriais nustatysime vidinius ir išorinius (rastrų formavimo įrenginio) temperatūros gradientų pasiskirstymus, sukeliamus lazerio, įrenginio konstrukcinių elementų.
4. Apibendrinus viso tyrimo rezultatus, pateikti rekomendacijas paklaidoms įvertinti, kompensuoti.

Temos naujumas

Naujumą sudaro tai, kad visi eksperimentiniai tyrimai, modeliavimai ir t. t. yra atliekami visiškai naujam technologiniam procesui, kurio analogų Lietuvoje nėra, ir pats įrenginys yra kuriamas vienintelėje šalies įmonėje, kuri kuria metrologines skales. Pirmaujančios užsienio firmos naudoja metalo pašalinimo principą, o kuriamoje technologijoje naudojamas naujas raibulių formavimo principas. Šis principas pasižymi tuo, kad paviršius yra pašiurkštinamas kelių nanometrų gyliu, taip sukuriant rastrus.

Temos aktualumas

Pasaulinėje rinkoje, kaip jau minėta, yra tik kelios įmonės, kuriose gaminamos metrologinės skalės, kurios jau yra įdiegusios naujausias technologijas, leidžiančias gaminti metalines skales. Lietuvoje veikiančios įmonės „Precizika Metrology“ siekis yra išlaikyti

konkurencingumą ieškant inovatyvių sprendimų, leidžiančių pasipriešinti didesnių kompanijų spaudimui. Naudojant naują rastrų formavimo technologinį procesą, bus galima gaminti ilgas bei lanksčias metrologines skales, kurias bus galima pritaikyti jau naujose pramonės srityse. Vis dėlto labai svarbus veiksnys yra kokybė, nes ji prastėja dėl temperatūros gradientų, kurie sąlygoja paklaidų susiformavimą, dėl kurių atsiranda netinkamas rastrų pasiskirstymas. Todėl labai svarbu jas nustatyti ir pašalinti.

Tyrimo metodai

Atliekama literatūros analizė, kurios metu nagrinėjama esamų technologijų pavyzdžiai daugiausia per patentus ir gamintojų puslapius. Taip pat literatūros analizė susipažįstant su naudojamais modeliavimo ir skaičiavimo metodais, taikytiniais temperatūros gradiento nustatymams; tokia pat analizė priemonėms ir įrenginiams. Panaudojami eksperimento planavimo metodai, kurie taikomi eksperimentiniams vidinių ir išorinių temperatūros gradientų pasiskirstymo nustatymams. Statistinis duomenų apdorojimas bei modeliavimo metodai taikant kompiuterinę programą „COMSOL“, kuria siekiama grafiškai (3D) išsiaiškinti temperatūros gradientų pasiskirstymą. Kompensavimo modelio sudarymas, leidžiantis nustatyti paklaidos dydį ir priartėti prie norimų kokybės standartų.

Darbo mokslinė vertė

Rastrinėms struktūroms formuoti yra naudojamas naujas rastrų formavimo principas, kurio metu ant poliruotos nerūdijančio plieno juostos rastrai formuojami ne išgarinus metalą, o formuojant raibulines struktūras (angl. *Laser induced periodic surface structures, LIPSS*). Kelių šimtų nanometrų gylio raibuliai, susiformavę metalo paviršiuje, stipriai pakeičia metalo atspindžio savybes, t. y. tokiu būdu formuojami režiai – rastrai, skirti padėties nustatymui. Tačiau naudojant šį naują rastrų formavimo metodą susiformuoja nežinomi terminiai procesai, kuriuos reikia ištirti. Eksperimentiškai gaunami vidiniai ir išoriniai temperatūros gradientai, kurių dydžiai skirtingai įtakoja juostos plėtimąsi ir gaunamą rastrų tarpusavio padėties kokybę. Gauti rezultatai leidžia atlikti kompensacijas ir tokiu būdu dalinai sumažinti suminę broko tikimybę.

Darbo aprobacija

Tyrimo rezultatai yra paskelbti straipsnyje „Metalinių rastrinių skalių formavimo metu susiformuojančios terminės paklaidos, jų kompensacija“, kuris buvo pristatytas 19-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS

1.1. Problemos apibūdinimas

Paveikiant kūną tam tikru šilumos kiekiu, jis deformuojasi, šildomi kūnai plečiasi, nes šildant suintensyvėja kūno dalelių šiluminis judėjimas. Kai kūnas vėsta, dalelių judėjimas lėtėja. Kietieji kūnai nuo šilumos plečiasi nevienodai, todėl įvairios medžiagos turi skirtingus temperatūros plėtimosi koeficientus.

Šiluminio plėtimosi mechanizmas aiškinamas prielaida, kad kūną sudarančios dalelės yra sujungtos sąveikos jėgomis, kurių dydis priklauso nuo atstumo tarp dalelių, todėl vienu dalelių šiluminiai virpesiai dėl sąveikos jėgų perduodami kitoms. Kūną pašildžius, padidėja kristalo energija bei vidutinis atstumas tarp gardelės mazgų dėl atsirandančio linijinio ir tūrinio plėtimosi. Dėl to padidėja kristalinės gardelės dalelių šiluminių virpesių amplitudė ir susilpnėja ryšiai tarp dalelių, dėl to kūnas galiausiai išsiplečia (*FIZ 121. Šiluminio plėtimosi koeficiento nustatymas*). Tokia neigiama, natūrali metalinio kūno savybė plėstis kaitinant yra problema formuojant skales, nes atsiranda temperatūros paklaidos, kurios sąlygoja netinkamą juostos kokybę, t. y. nevienodą rastrų tarpusavio išsidėstymą.

1.2. Temperatūros laukų ir temperatūros deformacijų modeliavimo metodų apžvalga

Informacija apie šiluminę metalo būseną apdirbimo metu leidžia detaliau išanalizuoti apdirbamo paviršiaus srities geometriją, medžiagos vidinių elementų struktūros virsmus, atsirandančių įtempimų ir sukietinimų dydžius bei kryptis. Todėl prieš atliekant eksperimentus, jei yra galimybė, reikia atlikti, kiek įmanoma, detalesnę modeliavimo analizę.

Baigtinių elementų metodo (BEM) algoritmas yra skaitinis metodas ir vienas iš universaliausių sprendžiant įvairių fizinių sistemų uždavinius, todėl nebereikia gilintis į tradicinius analitinius lygčių sprendimo būdus, kurių didžiausias trūkumas yra tas, kad jie dažnai yra specifiniai kiekvienai atskirai uždavinių klasei. Metodo esmė – nagrinėjamos konstrukcijos suskaidymas į žinomo dydžio ir formos smulkesnes dalis, kurioms galime pritaikyti standartinius skaičiavimus. Jau keletą dešimtmečių baigtinių elementų metodas yra vyraujanti inžinerinių konstrukcijų skaičiavimo technologija. Vienas iš šio metodo sunkumų yra neišreikštinė skaičiavimo rezultatų priklausomybė nuo pasirinkto baigtinių elementų tinklo.

Atliekant temperatūros analizę ir sprendžiant šilumos srauto perdavimo uždavinį nagrinėjamas kūnas ar objektas yra suskaidomas į keturias kraštinių dedamąsias: S1 – specifinė temperatūra; S2 – šilumos srautas; S3 – konvekcija; S4 – radiacija. Atsakymas randamas išsprendus kiekvienos dalies lygtis.

Bendroji Furjė šilumos perdavimo formulė (Lewis, Nithiarasu 2004):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

Kraštinės sąlygos lygios:

1. Specifinė temperatūra paviršiuje S1:

$$T_s = T_1(x, y, z, t) \quad (1.2)$$

2. Šilumos srautas paviršiuje S2:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} \cos(\vec{n}, \vec{i}) + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \cos(\vec{n}, \vec{j}) + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \cos(\vec{n}, \vec{k}) + q = 0 \quad (1.3)$$

3. Konvekcija paviršiuje S3:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} \cos(\vec{n}, \vec{i}) + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \cos(\vec{n}, \vec{j}) + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \cos(\vec{n}, \vec{k}) + h(T_s - T_e) = 0 \quad (1.4)$$

4. Radiacija paviršiuje S4 (Huebner *et. al* 2001):

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} \cos(\vec{n}, \vec{i}) + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \cos(\vec{n}, \vec{j}) + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \cos(\vec{n}, \vec{k}) = \sigma \varepsilon T_s^4 - \alpha q_r, \quad (1.5)$$

čia h – konvekcijos koeficientas; T_s – nežinoma paviršiaus temperatūra; T_e – konvekcinė kaitos temperatūra; σ – Stefano Bolcmano konstanta; ε – paviršiaus emisijos koeficientas; α – paviršiaus sugerties koeficientas. Taip pat svarbu nurodyti kūno pradinę temperatūros lauką laike $t = 0$: $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$.

Elementas V yra padalinamas į baigtinius elementus, sujungtus į mazgus. Bendroji formulė elementui gali būti suformuota iš kelių tarpusavyje sujungtų baigtinių elementų formulių. Formos funkcija N_i yra naudojama baigtinio elemento vidinės temperatūros interpoliacijai:

$$T = [N] \cdot \{T\}; [N] = [N_1 \ N_2 \ \dots]; \{T\} = \{T_1 \ T_2 \ \dots\} \quad (1.6)$$

Diferencijuojama temperatūros interpoliacinė formulė išskleidžiama į sekantį interpoliacinį santykį temperatūros gradientui (Nikishkov 2010):

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} \frac{\partial N_2}{\partial z} \dots \end{bmatrix} \cdot \{T\} = [B]\{T\}, \quad (1.7)$$

čia $\{T\}$ – temperatūros mazgų vektorius; $[N]$ – formos funkcijos matrica; $[B]$ – temperatūros gradiento interpoliacijos matrica. Naudodami Galerkinio metodą, galime perrašyti pagrindinę šilumos laidumo formulę tokia forma:

$$\int_V \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i dV = 0 \quad (1.8)$$

Įvedus skirtingumo teoremą į pirmus tris elementus ir kraštines sąlygas, susiformuoja gana ilga formulė, tačiau ją sutraukus į bendrą visiems žinomą formą, gauname tokią formulę:

$$\{q\} = -k[B]\{T\} \quad (1.9)$$

O pasinaudojus pastarąja gauname diskretinę baigtinių elementų formulę šilumos laidumo problemai spręsti:

$$[C]\{T\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\} \quad (1.10)$$

Šios formulės galima sutikti daugybę variantų. Priklausomai nuo autoriaus gali skirtis raidės bei trumpinimas. Kiekvienas formulės elementas yra išsprendžiamas atskirai (1.11):

$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV;$	$[K_c] = \int_V k [B]^T [B] dV;$	$[K_h] = \int_{S3} h [N]^T [N] dS;$
$[K_r]\{T\} = \int_{S4} \sigma \varepsilon T_s^4 [N]^T dS;$	$\{R_T\} = - \int_{S1} \{q\}^T \{n\} [N]^T dS;$	$\{R_Q\} = \int_V Q [N]^T dV;$
$\{R_q\} = \int_{S2} q_s [N]^T dV;$	$\{R_h\} = \int_{S3} h T_e [N]^T dS;$	$\{R_r\} = \int_{S4} \alpha q_r [N]^T dS;$

Priklausomai nuo situacijos galima naudoti skirtingas formulės variacijas, pavyzdžiui judančiai netiesinei (angl. *transient nonlinear*) problemai spręsti (Nikishkov 2010):

$$[C(T)]\{T\} + ([K_c(T)] + [K_h(T, t)] + [K_r(T)])\{T\} = \{R_Q(T, t)\} + \{R_q(T, t)\} + \{R_h(T, t)\} + \{R_r(T, t)\} \quad (1.12)$$

Tačiau toks sprendimo ieškojimo būdas yra labai sudėtingas ir reikalaujantis daug fizinių ir laiko resursų, todėl visiems šiems sprendimas yra pasinaudojamos kompiuterinės programos, kaip antai „COSMOS Multiphysics“ arba „ANSYS“. Jų viduje galime nubraižyti reikiamą elementą, suvedus parametrus ir suskaidžius į baigtinius elementus grafiškai pamatyti objekto deformacijas ir pan. Tokio sprendimo metu yra svarbu pasirinkti tinkamą baigtinį elementą, kuris gali būti kvadrato, trikampio, tetraedro ar pan. formos, nes nuo jo formos kis ir gaunamas grafinis tikslumas, rezultatas.

1.3. Temperatūros gradientų matavimo metodų ir priemonių apžvalga

Šiluma yra energija, kuri pereina visas sistemos ribas, ir temperatūros skirtumas yra potencialas tos šilumos sklidimui. Pirmas bei antrasis termodinamikos dėsniai, Niutono antrasis judesio dėsnis leidžia nuspėti šilumos didėjimą, kryptį sąveikaujant kūnui su jį supančia aplinka.

Vis dėl to šių dėsnių taikymas turi ribotas galimybes, todėl reikia pasinaudoti ir eksperimentine patirtimi..

Šilumos judėjimo mechanizmas yra kompleksinis, kadangi šiluma gali plisti trimis būdais: *laidumu, konvekcija ir spinduliavimu*.

Laidumas – tai šilumos keliavimo procesas, atsirandantis dėl molekulinio judėjimo, papildyto laisvais elektronais, per kūną (kietą, skystą ar dujinį) iš aukštesnės temperatūros srities link žemesnės temperatūros srities. Laidumas atsiranda ir tarp skirtingų kūnų, kai jie yra skirtingos temperatūros. Laidumas kietuose kūnuose priklauso nuo energijos tėkmės pernešamos molekulių, vibruojančios gardelės ir laisvų elektronų.

Konvekcijos būdu šilumą perneša judantis skystis arba dujos, todėl konvekcinis šilumos pernešimas yra neatskiriama susijęs su skysčio arba dujų judėjimu, be jo nevyktų konvekcija.

Spinduliavimas tai šiluma, kuri plinta elektromagnetinių bangų forma. Visos medžiagos spinduliuoja šilumą, dėl to galime nustatyti jų temperatūrą, bet taip pat jos sugėba šilumą ir sugerti. Spinduliavimo metu šiluma gali prasiskverbti per skaidrius paviršius, vakuumą.

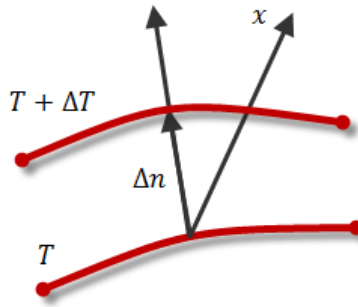
Šiluma labai dažnai plinta visais trimis būdais vienu metu. Vien laidumu šiluma dažniausiai plinta kietuose kūnuose. Vien spinduliavimu gali plisti tik vakuume, tačiau vien konvekcija šiluma negali plisti. Konvekcija neatsiejama susijusi su laidumu. Dažnai kartu su šiluma yra pernešama ir kūno masė, dėl to kietuose kūnuose įvyksta tarp molekulinio struktūrų suardymai. Todėl kartu skaičiuojant šilumą, skaičiuojama ir deformacija (Kakac, Yener 2014).

Iš termodinamikos dėsnių yra žinoma, kad temperatūra yra kūno būsenos parametras, rodantis jo įkaitinimo laipsnį. Bendrai temperatūra yra koordinačių ir laiko funkcija:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1.13)$$

Temperatūros reikšmių visuma kūne tam tikru laiko momentu vadinama temperatūros lauku ir lygybė yra jo matematinė išraiška. Jei temperatūra per laiką nekinta, temperatūros laukas vadinamas stacionariu, jeigu kinta – nestacionariu.

Kūno temperatūra gali kisti visomis trimis, dviem arba viena kryptimi. Priklausomai nuo to temperatūros laukas vadinamas trimačiu, dvimačiu ir vienmačiu. Bet kokiame temperatūros lauke yra taškų, kurių temperatūra vienoda. Jie sudaro taip vadinamąjį izoterminį paviršių. Tokių paviršių kūne yra aibė. Pavyzdžiui, išskirkime du, kurių temperatūros T ir $T + \Delta T$ (1.1 pav.).



1.1 pav. Temperatūros gradientas

Temperatūros pokytis tarp jų bet kuria kryptimi x bus ΔT , tačiau ilgio vienetė jis bus didžiausias normalės n kryptimi. Temperatūros pokyčio ir atstumo tarp izoterminių paviršių pokyčio normalės kryptimi santykio riba, vadinama temperatūros gradientu ir žymima (Gimbutis 1993):

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \text{grad } T \quad (1.14)$$

Temperatūros gradientas yra vektorius, kurio teigiama kryptis sutampa su temperatūros didėjimo kryptimi. Jo matavimo vienetas K/m . Jei kūne yra temperatūros gradientas, tai pernešama ir šiluma. Šilumos srautas ir šilumos srauto tankis yra vektoriai, kurie yra priešingi temperatūros gradiento kryptčiai, nes šiluma yra pernešama temperatūros mažėjimo kryptimi. Pagal Furjė dėsnį šilumos srauto tankis yra proporcingas temperatūros gradientui:

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (1.15)$$

Šioje lygtyje λ vadinamas šilumos laidumo koeficientu. Jis yra medžiagos fizikinis parametras ir rodo, kokį šilumos kiekį sugeba praleisti nagrinėjamoji medžiaga per laiko ir ploto vienetą, kai temperatūros gradientas lygus vienam. Minusas atsiranda, nes laidumo ir gradiento vektorių kryptys yra skirtingos (Gimbutis 1993).

Terpė, kurioje laidumas nekinta einant nuo vieno taško prie kito, vadinama homogenine, atvirkštiniu atveju vadinama heterogenine. Taip pat terpė vadinama izotropine, jei laidumas yra vienodas visomis vieno taško kryptimis, kitu atveju ji vadinama anizotropine, kaip pavyzdys būtų mediena, asbestas. Anizotropinėse terpėse šilumos srautas (angl. *heat flux*) dėl šilumos laidumo duota kryptimi gali būti proporcingas temperatūros gradientui atvirkštinei kryptčiai, dėl to lygtis (1.15) gali negaliooti (Kakac, Yener 2014). Izotropinėse terpėse ši lygtis gali būti parašyta kiekvienos koordinatės kryptimi:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}; \quad q_y = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta y}; \quad q_z = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (1.16)$$

Remiantis lygtimis (1.15) ir (1.16) galime išspręsti šilumos pernešimo procesą labai mažame tūryje per labai mažą laiko vienetą. Turime elementarų stačiakampį gretasienį, kurio

kraštinės yra dx , dy , dz ir temperatūros lauko išraiška $T = f(x, y, z, t)$. Į gretasienį per laiką dt patenka šiluma dq' ir išeina dq'' . Jų skirtumas bus lygus energijai, sukaupiai gretasienyje per laiką dt dėl šilumos pernešimo atitinkamomis kryptimis. Gretasienyje sukaupias visas energijos kiekis bus lygus:

$$\frac{\delta T}{\delta t} + w_x \frac{\delta T}{\delta x} + w_y \frac{\delta T}{\delta y} + w_z \frac{\delta T}{\delta z} = a \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right), \quad (1.17)$$

čia $\frac{\delta T}{\delta x}$ – temperatūros pokytis ilgio vienetu; $\frac{\delta T}{\delta t}$ – temperatūros pokytis per laiko vienetą; w_x – greičio projekcija ašyje; a – temperatūros laidumo koeficientas

Kairioji pusė yra pilnoji funkcijos $T = f(x, y, z, t)$ išvestinė laiko atžvilgiu. Dydis $\left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right)$ vadinamas Laplaso operatoriumi ir žymimas $\nabla^2 T$. Sutvarkius lygtį (1.17) gauname Furjė – Kirchofo lygtį (Gimbutis 1993):

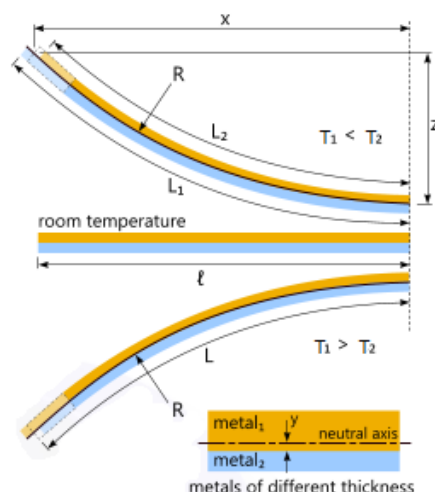
$$\frac{\delta T}{\delta t} - a \nabla^2 T = 0 \quad (1.18)$$

Tačiau, kaip buvo anksčiau minėta, temperatūros gradiento nustatymui reikalinga eksperimentinė aparatūra. Matuojant gradientą, vieno jutiklio rodmenų neužtenka, kadangi negalima susidaryti bendro temperatūros sklaidimo vaizdo, todėl, atliekant eksperimentą, priklausomai nuo tiriamo objekto, panaudojame nuo 2 iki 20 jutiklių. Tokiu būdu galime išanalizuoti temperatūros didėjimo ir aušimo tendencijas. Taip pat galime paminėti, kad temperatūros gradiento nustatymas yra labai panašus į temperatūros lauko nustatymą.

Gali būti išskiriami tokie temperatūros matavimo metodai: *sąlytiniai* ir *nesąlytiniai*, kuriems priskiriami tam tikri matavimo įrenginiai.

Sąlytiniai temperatūros matavimo metodai paremti tuo, kad jautrus temperatūrai elementas kontaktuoja su objektu ar terpe, kurio temperatūrą norime išmatuoti, tačiau matavimo rezultate gauname ne paties objekto, o jautraus elemento temperatūrą. Todėl neišvengiamai gauname paklaidas, kurias galime sumažinti kalibravimo būdu įvertinant jutiklio ir paviršiaus kontakto ypatumus. Prie sąlytinių priskiriami *bimetaliniai*, *termorezistoriniai*, *termistoriniai* ir *termoporiniai* jutikliai.

Bimetaliniai termometrai. Kadangi yra žinoma, kad kūnas, paveiktas temperatūros, deformuojasi, todėl galime pasinaudoti kūno plėtimosi dėsniu, t. y. temperatūrai nustatyti panaudojant *bimetalinius termometrus*. Šie termometrai susideda iš dviejų skirtingo metalo plokštelių, turinčių skirtingą temperatūros plėtimosi koeficientą. Dėl temperatūros pokyčio plokštelių matmenys keičiasi nevienodai ir dėl to plokštelė išlinksta.



1.2 pav. Bimetalinis termometras (*Bimetallic Strip Calculator*)

Išlinkusios plokštelės kreivumo spindulys R atvirkščiai proporcingas temperatūros pokyčiui (Čižiūnas 2008):

$$R \approx \frac{2b}{3(a_A - a_B)(t_2 - t_1)} \quad (1.19)$$

čia b – plokštelės storis; a_A, a_B – plokštelių linijiniai plėtimosi koeficientas

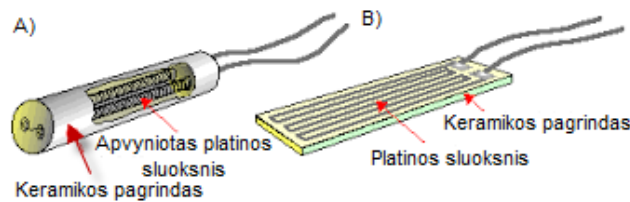
Tokie termometrai naudojami temperatūros diapazone nuo -150 iki $+1000$ °C, o matavimo paklaida siekia $0,5 - 1,5$ %. Tokie termometrai sutinkami ir mechanikoje, nes atlieka termostato vaidmenį.

Termorezistorinės temperatūros matavimo priemonės. Šie jutikliai naudojami matuoti temperatūrą koreliuojant jutiklio varžą su temperatūra. Dauguma šių jutiklių susideda iš plonų, ilgų laidelių, apvyniotų aplink keramikos ar stiklo šerdį. Šis jutiklis yra gana trapus, todėl dažnai yra montuojamas į apsauginį tūrį. Jautrusis elementas yra gaminamas iš platinos, nikelio arba vario (*electrical4u.com*). Kiekviena medžiaga turi savą varžos pokytį, kuomet pakinta temperatūra. Jutikliams yra reikalingas energijos šaltinis, kad generuotų rezultatą. Rezistorių varžos priklausomybė nuo temperatūros aprašoma n – osios eilės polinomu (Čižiūnas 2008):

$$R_t = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n) \quad (1.20)$$

Termorezistoriuose labai plačiai naudojama platina, nes varžos priklausomybė nuo temperatūros yra artima tiesinei. Temperatūros diapazonas siekai nuo $-272,5$ iki $961,78$ °C. Šie jutikliai gali būti įvairios formos: *plonasluoksniai*, *apvynioti* ir *susukti* (1.3 pav.). *Plonasluoksniai* turi jautrų elementą, kuris yra suformuotas padengiant ploną sluoksnį jautrios medžiagos, pvz. platinos, ant keramikinio pagrindo. Vėliau šis elementas yra padengiamas apsauginiu plastiko sluoksniu. Šių jutiklių trūkumas, kad jie nėra labai stabilūs, gali būti naudojami ribotame temperatūros diapazone. Darbinė temperatūra iki 300 °C. *Apvyniotieji* elementai yra tikslesni, ypač esant aukštomis temperatūroms. Šerdies diametras leidžia tolygiai valdyti medžiagos plėtimąsi

išvengiant trukdžių ir šuolių. Šerdis gali būti cilindrinė arba plokščia, svarbiausia, kad būtų elektriškai izoliuota. Darbinė temperatūra iki 600 °C. *Susukti* elementai yra labiau pritaikomi pramonei, nei eksperimentiniuose matavimuose, kadangi jų veikimo principas labai panašus į bimetalinius termometrus. Darbinė temperatūra iki 800 °C.



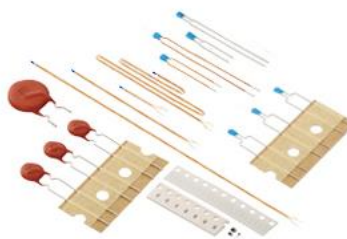
1.3 pav. Termorezistoriniai jutikliai: A) Apvyniotas; B) Plonasluoksnis

Termistorinės temperatūros matavimo priemonės. Termistoriai yra rezistoriai, kurių pasipriešinimas kinta priklausomai nuo temperatūros. Palyginus su termorezistoriais, čia vietoj grynų metalų naudojami keramikos, sintetiniai deimantai, polimerai. Darbinė temperatūra svyruoja nuo –90 iki +130 °C (*Temperature Sensor - The Thermistor*). Imant pirmos eilės aproksimaciją, įvertinant santykius tarp varžos ir kad temperatūra yra tiesinė, gauname tokią išraišką (*Thermistor*):

$$\Delta R = k \Delta T, \quad (1.21)$$

čia ΔR – varžos skirtumas; ΔT – temperatūros skirtumas; k – pirmos eilės temperatūros varžos koeficientas

Termistoriai gali būti klasifikuojami į dvi grupes, priklausomai nuo k reikšmės. Jei k yra teigiamas, varža didėja didėjant temperatūrai ir jutiklis vadinamas teigiamos temperatūros koeficiento termistoriumi (PTC) ir atvirkščiai, jei varža mažėja, didėjant temperatūrai turėsime neigiamo temperatūros koeficiento termistorių (NTC). Dažniausiai naudojami turintys neigiamą koeficientą.

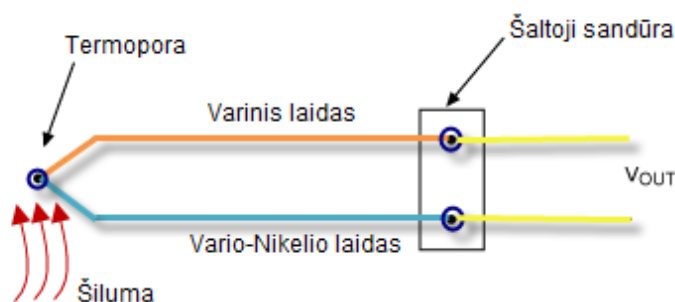


1.4 pav. Neigiamo temperatūros koeficiento termistoriai (*NTC Thermistors*)

Termistoriai gerokai jautresni temperatūros pokyčiui negu termorezistoriniai jutikliai, tačiau jie yra mažiau tiesiški. Temperatūros varžos koeficientas yra išreiškiamas taip (Lauruška, Ščiukaitė 2006):

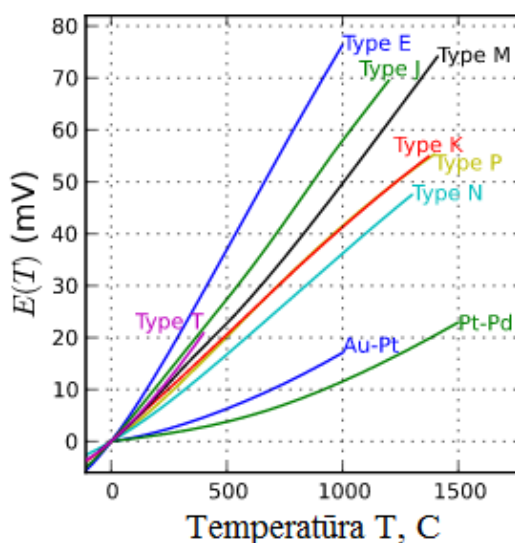
$$\alpha_T = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT} \quad (1.22)$$

Termoporinės temperatūros matavimo priemonės. Termopora (1.5 pav.) susideda iš dviejų nevienodų metalinių laidininkų, kurie yra sujungti viename taške, kuriame dėl jų medžiagos ir temperatūros skirtumo, šaldant ar kaitinant, atsiranda elektrovaros jėga (EVJ). Šis reiškinys vadinamas termoelektriniu Seebecko efektu ir yra panaudojamas temperatūrai matuoti. Termopora matuoja dviejų sandūrų temperatūros skirtumą. Norint išmatuoti reikia, kad vienos sandūros temperatūra būtų žinoma, o kita sandūra liestųsi su matuojamu objektu (*Thermocouples. Using thermocouples to measure temperature*).



1.5 pav. Termoporos schema

Temperatūra nustatoma voltmetru išmatuojant termoporos sukuriama EVJ. Pati termopora turi turėti gerą šiluminį kontaktą su matuojama terpe. Termoporos naudojami specialūs lydiniai, kurie turi žinomą ir kartotiną ryšį tarp temperatūros ir įtampos. Skirtingi lydiniai turi skirtingas darbinės temperatūras, išsikariaimi tokie pagrindiniai tipai: *J* – darbinė temperatūra svyruoja nuo 0 iki 750 °C; *K* – nuo –200 iki + 1250 °C; *E* – nuo –200 iki + 900 °C; *T* – nuo –250 iki + 350 °C. Tai tik keli tipai, kurių galima priskaičiuoti iki 15 (*Thermocouples. Using thermocouples to measure temperature*). Jų pasirinkimas priklauso nuo matuojamo temperatūros diapazono, cheminės terpės aplinkos, vibracijos buvimo, instaliacijos sudėtingumo. Tiksliausios yra platinos bei platinos ir rodžio termoporos. Jų santykinė matavimo paklaida siekia $\pm 0,25\%$ matuojamosios vertės.



1.6 pav. Termoporų temperatūros charakteristikos, priklausomai nuo įtampos (*Thermocouple*)

Nesqlytinio matavimo atvejais naudojami įrenginiai, kurie temperatūrą matuoja spinduliavimo, optiniu ar ultragarso būdu.

Pirometriniai matavimo metodai. Kūnai, kurių temperatūra yra aukštesnė už absoliutų nulį, spinduliuoja elektromagnetines bangas. Spektrinio spinduliavimo intensyvumas priklauso nuo bangos ilgio ir spinduliavimo objekto temperatūros. Matuojama energijos sugertis per juodo kūno ploto vienetą apskaičiuojama panaudojant Planko dėsnį (*Radiation law*):

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (1.23)$$

Energinio šviesio pasiskirstymą įvairiose spektro dalyse apibūdina kūnų emisijos geba $r_{\lambda,T}$ (arba energinio šviesio spektrinis tankis). Ji priklauso nuo kūno temperatūros T ir spinduliuojamo bangos ilgio λ . Jei bangų ilgių intervale nuo λ iki $\lambda + d\lambda$, esant kūno temperatūrai T , energinis šviesis yra R_T , tai emisijos geba yra (*Šiluminio spinduliavimo tyrimas*):

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda}. \quad (1.24)$$

Ryšį tarp įvairių kūnų emisijos ir sugertiems gebų nusako Kirchofo dėsnis. Kūnai, turintieji didesnę absorbcijos pajėgumą, pasižymi didesne spinduliavimo galia. Bet kurių kūnų emisijos ir sugerties gebų santykis nepriklauso nuo jų prigimties, o priklauso tik nuo spinduliuojamo bangos ilgio ir kūno temperatūros. Kirchofo dėsnis išreiškiamas lygtimi (*Šiluminio spinduliavimo tyrimas pirometru*):

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_2 = \dots = \frac{E_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T} \quad (1.25)$$

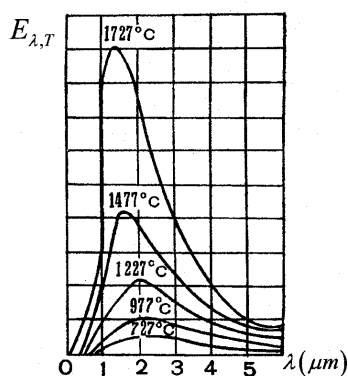
Kirchofo dėsnis rodo, kad kiekvienas kūnas sugeria tuos spindulius, kuriuos pats išspinduliuoja. Dėl šios priežasties dujų absorbciniai (sugerties) spektrai turi tamsias linijas tose spektro vietose, kuriose būtų šviesios linijos, jei dujos pačios spinduliuotų. Taip pat šis dėsnis paaiškina, kodėl du skirtingi kūnai toje pačioje temperatūroje yra nevienodo ryškio ir, atvirkščiai, du skirtingi to paties ryškio kūnai turi skirtingas temperatūras (*Šviesos bangos ilgio matavimas spektroskopu*). Taip yra todėl, kad skirtingų kūnų nevienodos emisijos gebos.

Stefano – Bolcmano dėsnis. Nustatyta, kad bet kurio kūno energinis šviesis R_T yra proporcingas absoliučios temperatūros ketvirtajam laipsniui, o Bolcmanas parodė, kad ne bet kurio, o tik absoliučiai juodo kūno energinis šviesis proporcingas T^4 (*Derivation of the stefan-boltzmann law*):

$$P = \sigma T^4, \quad (1.26)$$

čia σ – Stefano – Bolcmano konstanta, lygi $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Šis dėsnis rodo, kad visi kūnai spinduliuoja esant bet kokiai temperatūrai $T \neq 0\text{K}$, tačiau spinduliavimo intensyvumas ypač didelis aukštų temperatūrų srityje. Taikant Stefano ir Bocmano dėsnį, galima apskaičiuoti bet kokio kūno (žmogaus, augalo, dirvožemio) per sekundę išspinduliuotą energiją (*Heat Radiation. Stefan-Boltzmann Law*):

$$P = e\sigma A(T^4 - T_c^4) \quad (1.27)$$



1.7 pav. Absoliučiai juodo kūno spinduliavimas

Iš 1.7 pav. matyti, kad, didėjant temperatūrai, absoliučiai juodo kūno emisijos geba didėja visose spektro dalyse. Be to, kiekviena kreivė turi maksimumą, kuris, didėjant temperatūrai, ne tik didėja, bet ir slenka į trumpesnių bangų sritį. Taigi didžiausia emisijos gebos reikšmė, kylant kūno temperatūrai, tenka vis trumpesnėms bangoms. Kadangi visų kūnų šiluminis spinduliavimas susijęs su temperatūra, todėl, matuojant spinduliavimo intensyvumą, galima sužinoti kūnų temperatūrą. Temperatūros matavimo metodai, pagrįsti šiluminio spinduliavimo dėsniais, vadinami *optine pirometrija*.

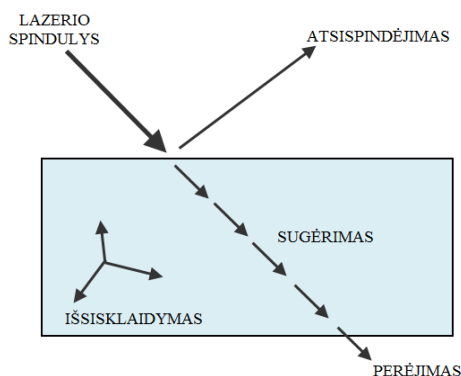
Pirometras yra graduotas absoliučiai juodo kūno spinduliavimo atžvilgiu, todėl jo išmatuota temperatūra, vadinama radiacine temperatūra, visada bus mažesnė negu objekto temperatūra. Tikra objekto temperatūra randama iš formulės (*Šiluminio spinduliavimo tyrimas pirometru*):

$$T = k \frac{T_r}{\sqrt[4]{\epsilon}} \quad (1.28)$$

1.4. Lazerinio apdirbimo technologijos ypatumai

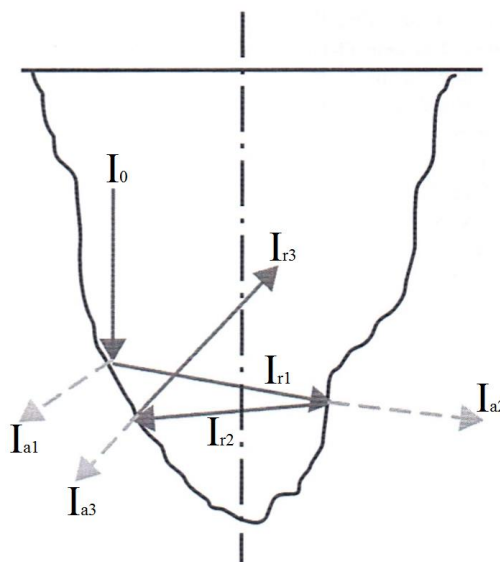
Lazerinė technologija naudojama skirtingose pramonės srityse, nes pasižymi tam tikrais privalumais: neigiamų šiluminių procesų pašalinimas, t. y. lazerio apdirbimo efektyvumas priklauso nuo šiluminių ir optinių medžiagos savybių, todėl kietos ar trapios medžiagos su žemu šiluminiu plėtimusi ar laidumu gali būti lengvai apdirbamos; apdirbimo lankstumas, t. y. lazeris turi dideles pjovimo, virinimo, gręžimo, šiluminio apdirbimo, graviravimo galimybes nenaudojant kelių atskirų – specifinių įrenginių, o proceso valdymas yra efektyvus ir neleidžiantis atsirasti klaidoms;

nesąlytinis procesas, t. y. pjovimo įrankiai, pjovimo jėgos, vibracijos yra pašalinamos naudojant lazerio spindulį (Dahotre, Samant 2012). Lazerio energija gali būti kaupiama ir nukreipiama tiksliai ten, kur reikia, nepažeidžiant gilesnių sluoksnių. Rezultate gauname švarų, tikslų, greitą pjūvį. Dėl šių savybių jį galime panaudoti ir medicinoje. Lazerio spinduliu paveikus medžiagos paviršių, įvyksta keli skirtingi fizikiniai reiškiniai: atspindėjimas, sugėrimas, išsisklaidymas bei perėjimas.



1.8 pav. Lazerio spindulio sąveika su medžiaga

Sugėrimas (angl. *absorbtion*) – tai sąveika tarp medžiagos elektronų ir elektromagnetinės spinduliuotės, kuri priklauso nuo spektrinių sugerties charakteristikų bei medžiagos bangos ilgio. Sugerčiai įtakos turi orientacinis kampas tarp medžiagos paviršiaus ir spindulio kritimo bei spindulio kaitojimų, atspindžių skaičius. Pažvelkime įdėmiau, kaip galimai pasiskirsto krintančio spindulio atspindžiai ertmėje.



1.9 pav. Daugkartiniai atspindžiai esant kaitojimo režimui (Dahotre, Samant 2012)

I_0 yra krintantis lazerio spindulys, I_{a1}, I_{a2}, I_{a3} yra atitinkamai pirma, antra ir trečia sugertis (angl. *absorbtion*) ir I_{r1}, I_{r2}, I_{r3} yra atitinkamai atspindžiai. Dėl nelygaus medžiagos paviršiaus

susiformuoja kelių atspindžių efektas, todėl esant pakartotinam apdirbimo procesui, suformuoja skirtingi temperatūros rodmenys. Lazerio galia Q_a sugerta medžiagos po n_r atspindžių:

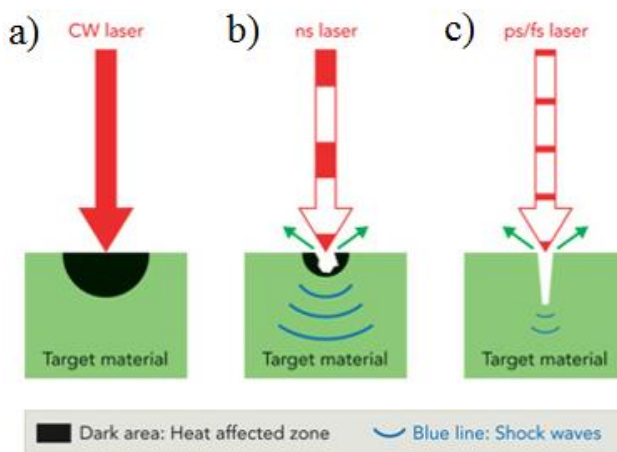
$$Q_a = Q(r_c)^{n_r}, \quad (1.29)$$

čia Q yra lazerio galia; r_c yra nuo kampo priklausantis medžiagos atspindžio koeficientas; n_r atspindžių skaičius, kuris apskaičiuojamas (Dahotre, Samant 2012):

$$n_r = \frac{\pi}{4\theta}, \quad (1.30)$$

čia θ yra kampas, kuris susidaro tarp ertmės sienelės ir normalios spindulio kritimo krypties. Tam tikroms medžiagoms, kaip struktūrinė keramika (angl. *structural ceramic*), šiluminis laidumas yra mažesnis nei metalams. Dėl to keramikoje energijos sugertis įvyksta staigiai ir visas energijos kiekis bus staigiai sugertas tol, kol bus formuojamos aukštos kokybės ertmės, tuštumos ar pan. Temperatūros pasiskirstymai medžiagoje priklauso nuo terma – fizikinių medžiagos parametrų (specifinė šiluma, emisija, tankis, šiluminis laidumas, šiluminė difuzija ir pan.), ruošinio matmenų bei lazerio parametrų (galios, impulso laiko, dažnio ir pan.) (Dahotre, Samant 2012). Dėl šių parametrų skirtingų santykių lazerinio apdirbimo metu įvyksta skirtingos medžiagos virsmo stadijos: kaitinimas, paviršiaus lydymasis, paviršiaus išgaravimas, plazmos formavimas. Šie reiškiniai skirtingai įvyksta esant dviem lazerių tipams: nuolatinio arba impulsinio ilgo veikimo ir impulsinio ultra greito veikimo.

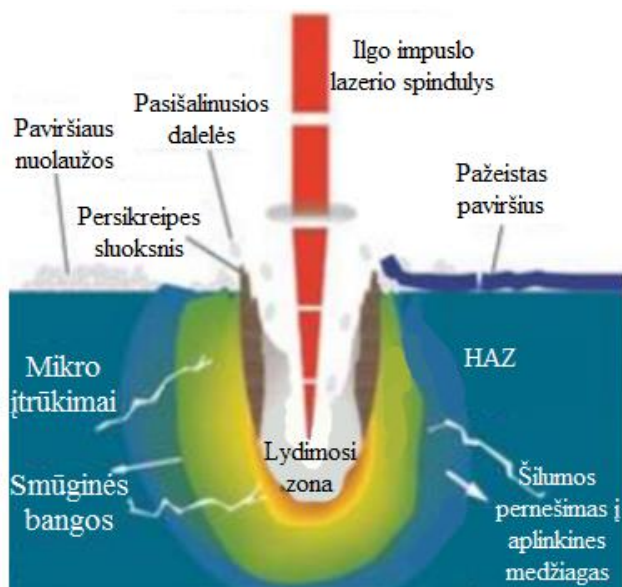
Kad pasiekti aukštos kokybės lazerinio mikro apdirbimo rezultatus tam tikroms medžiagoms, reikia nustatyti tinkamus lazerio operacinius parametrus: bangos ilgį, kartojimų dažnį, vidutinę galią, impulso trukmę, fokusavimo aukštį, taško dydį, judėjimo greitį ir t.t. Ultra greito (angl. *ultra fast*) lazerinio apdirbimo sistema dramatiškai skiriasi nuo visuotiniai įprastų lazerio procesų, kurie naudoja nuolatinio veikimo ar ilgesnius mikrosekundinius (10^{-6}) lazerio spindulius. Didžiausias skirtumas kyla iš bazinio principo ar mechanizmo naudojamo medžiagos pašalinimo procese.



1.10 pav. Skirtingų lazerių sąveika su medžiaga

1.10 pav. Skirtingų lazerių sąveika su medžiaga a) nuolatinio veikimo (CW); b) nanosekundinio (ns); c) ultra greiti piko/femtosekundinio (ps/fs) lazerio impulsų schematinis veikimas. Juoda sritis parodo taip vadinamos karščio paveiktos zonos (angl. *Heat Affected Zone* (HAZ)) dydį. Mėlynos linijos parodo smūgio bangas, sukurtas lazerio spindulio impulso (*Femtosecond laser micromachining: a back-to-basics primer*).

Nuolatinio veikimo lazeriai (CW) veikia fototerminės (angl. *photothermal*) sąveikos principu, t. y. pašalina medžiagą tiesiogiai ją išlydant ir sukuriant didelę HAZ sritį. Ilgo impulso (ns) lazerinio apdirbimo metu, 1.11 pav., energija yra perduodama sąlyginai ilgą laiką, o medžiagos pašalinimas vyksta per išlydytą medžiagos kiekį, kuris yra išstumiamas garavimo slėgio ir atitrūkimo jėgų pagalba. Dėl to sugeneruojami nepageidaujami reiškiniai, tokie kaip: išlydymas ir staigus medžiagos kietėjimas, spalvos pakitimas, įtrukimų ir ertmių atsiradimas. Šis procesas yra labai nestabilus, kadangi skystosios fazės virsmo ir kintančios garavimo sąlygos sudaro komplikotą sistemą. Lydymosi sluoksnis yra persikreipęs ir persilydęs, tai sąlygoja nepageidaujamus apdirbto paviršiaus pakitimus; apdirbimo metu šiluminė energija nelieka lokali; šiluma sklinda priklausomai nuo lazerio parametrų ir medžiagos savybių.

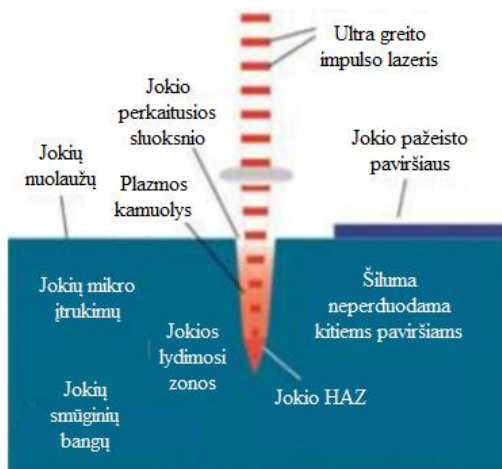


1.11 pav. Ilgo impulso sąveika su medžiaga (*Seminar on laser micromachining*)

Apibendrintai galime išreikšti tokius procesus, kaip:

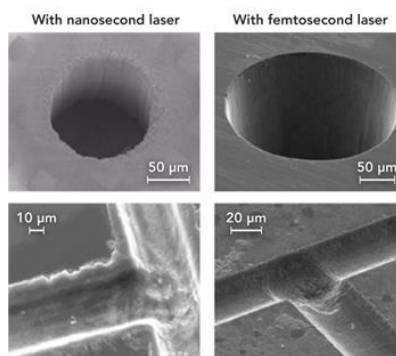
- medžiagos lydymąsi;
- mažų atplaišų pasklidimą ant paviršiaus, kurios sąlygoja užteršimą. Tai atsitinka dėl susidariusių dujų lydymosi metu, kurios išsklaido daleles po paviršių;
- atsiranda mikro įtrūkimai. Jie lieka medžiagoje visam laikui ir gali sąlygoti ateityje gilesnius ir pavojingesnius įtrūkimus. Jų galime išvengti pašalinus viršutinius sluoksnius atskiromis apdirbimo operacijomis;

- pjovimo juosta didesnė nei lazerio generuojamas taškas. Tai atsiranda dėl to, kad lydymosi sritis yra didesnė nei lazerio taško sritis. Dėl to gaunasi dideli paviršiaus šiurkštumai, kurių ištaisyti jau neįmanoma (*Ultra fast laser micromachining handbook*).



1.12 pav. Ultra greito impulso sąveika su medžiaga (*Seminar on laser micromachining*)

Panaudojant ultra greitą lazerį, kuris veikia jau fotošalinimo (angl. *photoablation*) principu, lazerio impulso trukmė yra daug trumpesnė nei laikas, skirtas energijai pasiskirstyti tarp laisvų elektronų ir medžiagos vidinių dalelių struktūros. Ekstremaliai aukštas slėgis ir temperatūra gali būti suformuojama labai mažame (μm) gylyje. Medžiaga pašalinama nuo paviršiaus tiesioginiu garinimu, nesuformuojant kintančių sluoksnių. Tačiau vis vien yra suformuojamas labai mažas HAZ sluoksnis, kuris susiformuoja tik tuomet, kai yra labai didelis impulsų kartojimo dažnis. Ultra greitų lazerių energijos poveikis susiformuoja tokiaame laiko mastelyje, kuris prilygsta atomų relaksacijos procesui. Lazerio energija yra absorbuojama elektronų, kurie palieka jonų lauką ir tik nutrūkus lazerio impulsui terminis stabilizavimas prasideda. Kitaip tariant, yra suardomas molekulinis arba atominis sluoksnis, kuris laiko medžiagą vientisą. Naudojant didelio dažnio impulsus laiko užtenka energijai pasišalinti ir nesuformuoti HAZ (*Femtosecond laser micromachining: a back-to-basics primer*). Absorbuojama lazerio energija pašalinama kartu su medžiagos dalelėmis bei garais, tokiu būdu nesusidaro gilesnės terminio poveikio zonos.



1.13 pav. Formavimo pavyzdžiai naudojant skirtingus lazerius: kairėje – nano, dešinėje femto sekundinis lazeris (*Femtosecond laser micromachining: a back-to-basics primer*)

1.5. Tyrimo užduoties formulavimas

Kadangi yra žinoma, kad, esant natūraliai metalo savybei plėstis keičiant temperatūrą, apdirbimo metu susiformuoja temperatūros gradientai, dėl kurių atsiranda rastrų formavimo paklaidos. Tyrimais bus siekiama būtent išsiaiškinti deformacijas ir paklaidas, sukkeliamas temperatūros gradiento, kurios bus vertinamos kompensavimo metu. Norint tai atlikti, yra keliamos tokios užduotys:

1. Turint surinktą įrenginio sistemą nustatyti galimus ir esamus šilumos šaltinius, kurie turės įtakos temperatūros laukų pasiskirstymui. Tokiu būdu išskiriami du eksperimento planai, skirti vidinių, t. y. lazerio bei išorinių, t. y. viso įrenginio, temperatūros (šilumos) laukų pasiskirstymui tirti.

2. Suformuojant eksperimento atlikimo planą ir parinkus tyrimams reikalingą duomenų fiksavimo įrangą, atlikti eksperimentus, kurių rezultate bus gaunami temperatūros laukų pasiskirstymo grafikai lazerio veikimo zonoje ir rastrų formavimo įrenginio erdvėje. Tyrimams bus naudojama nerūdijančio plieno ruošinys bei atitinkamai išdėstyti temperatūros jutikliai.

3. Surinkus lazerinio įrenginio parametrus, tokius kaip lazerio energija, bangos ilgis, dažnis, judesio trajektorija ir pan., bei medžiagos parametrus, tokius kaip tankis, šiluminės talpa, laidumas, atlikti temperatūros laukų modeliavimą „COMSOL“ programa, gautuose rezultatuose bus galima grafiškai pamatyti šilumos pasiskirstymą bei deformacijas rastro formavimo metu. Gauti duomenys iš dalies panaudojami palyginimui su praktinio eksperimento rezultatais.

4. Pagal gautus rezultatus suformuoti paklaidų kompensavimo metodiką ir gauti paklaidos kompensavimo dydį. Kompensacinis modelis sudarytas dviejų mikroskopų sistemai, kuri fiksuos rastrų padėties nuokrypius.

2. TEMPERATŪROS LAUKŲ MODELIAVIMAS

2.1. Temperatūros laukų formavimo modelio sudarymas

Lazerinio apdirbimo metu arba lazerio poveikio į paviršių metu sugerama tik dalis energijos, kuri apibūdinama sugėrimo efektyvumo koeficientu A_{ef} (Nikishkov 2010):

$$A_{ef} = I - R_{ats} \quad (2.1)$$

Šį koeficientą galime vadinti efektyvaus lazerinio paviršiaus terminio apdirbimo naudingumo koeficientu. Kadangi jis apibūdina ne tik atsirandančius nuostolius dėl atspindžio, bet ir dėl apdirbamame paviršiuje susiformavusio plazmos debesio. Šiluminiais procesams skaičiuoti pasinaudojama šiluminio poveikio intensyvumo apibūdinimo dydis q , kuris apibrėžia dalį lazerinės spinduliuotės galios, sugeriamos metalo, ir išreiškiamas lygtimi (Nikishkov 2010):

$$q = A_{ef} \cdot P, \quad (2.2)$$

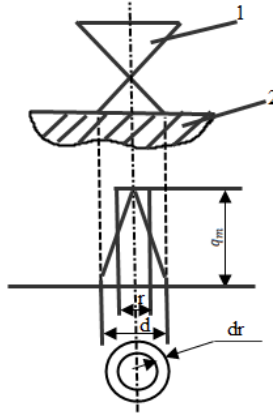
čia q – efektyvioji šiluminė galia; P – lazerinės spinduliuotės galia.

Kadangi lazerinė spinduliuotė yra koncentruotas energijos srautas, todėl galime sakyti, kad apdirbimas vyksta koncentruotame mažame taške. Tokiu atveju šiluminių reiškinių analizei galima taikyti N. Rykalino taškinio šilumos plitimo teoriją (Рыкалин *et al.* 1985). Ši teorija įgalina sėkmingai apskaičiuoti temperatūros laukus zonose, nutolusiose nuo šaltinio centro 3...5 karto toliau nei lazerinės spinduliuotės taškas d . Bendruoju atveju yra naudojamas normalusis (Gauso) šiluminės galios skirstinys. Esant tokiai spinduliuotei temperatūra paviršiuje pasiskirsto taip pat pagal normalinį dėsnį (2.1 pav.):

$$q_d(r) = q_m e^{-kr^2}, \quad (2.3)$$

čia $q_m = A_{ef} \cdot E_m$ – maksimalus galios tankis dėmės centre; k – koncentracijos koeficientas. Suintegavę šiluminio šaltinio galios tankį kaitiname paviršiuje F , gauname efektyviosios šiluminės galios q vertę:

$$q = \int_F q_d(r) dF \quad (2.4)$$



2.1 pav. Normalinis galios tankio pasiskirstymas lazerinės spinduliuotės dėmėje (Jonušas, Kalpokas 2004)

Po integralinį reiškinių išraišką išskleidus pavidalu, panaudojus žiedinį elementą, kurio spindulys r ir plotis dr , gauname (Jonušas, Kalpokas 2004):

$$q = \frac{\pi}{k} q_m, \quad (2.5)$$

$$\text{čia } k \cong \frac{3}{r_d^2}$$

Naudojantis šiomis lygtimis galima eksperimentiškai nustatyti normalinio galios pasiskirstymo tankio parametrus. Apdirbimo metu susiformuoja įvairūs paviršiaus faziniai virsmai, kuriuos galime apskaičiuoti klasikine šilumos laidumo lygtimi pasinaudojus spinduliuotės tankio pasiskirstymo dėsnio Dekarto koordinatėje sistemoje bei vienalypiu integralu. Tačiau visos šios sistemos pritaikomos ribotame parametrų kitimo intervale, dėl ko visas sprendimas pasidaro painus ir sudėtingas, todėl galima pasinaudoti supaprastintomis išraiškomis. Esant paviršiaus temperatūrai dėmės centre $T_{pav} = T(0,0)$, gauname:

$$T_{pav} = \frac{A_{ef} P}{r \lambda} (0,147 - 0,054 \ln \alpha) \quad (2.6)$$

Analogiškai gaunamas stacionarus temperatūros pasiskirstymas pagal kaitinimo zonos plotį $T(y,0)$ ir gylį $T(0,z)$:

$$\ln \frac{T_{pav}}{T(y,0)} = (0,75 + 0,14 \ln \alpha) \left(\frac{y}{z} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$\ln \frac{T_{pav}}{T(0,z)} = (2,22 + 1,36 \ln \alpha) \frac{z}{r} \quad (2.8)$$

Valdomų parametrų skaičiui sumažinti paviršiaus temperatūra gali būti išreiškiama taip:

$$T_{pav.} = T_{lyd} \cdot K \quad (2.9)$$

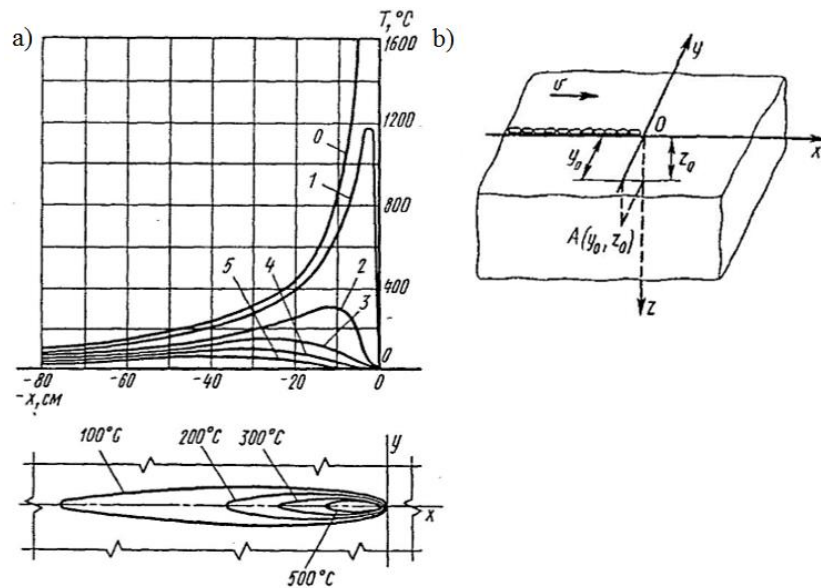
Reikiamai temperatūrai (2.9) pasiekti dėmės spindulys apskaičiuojamas pagal formulę (Jonušas, Kalpokas 2004):

$$r = \frac{A_{ef} P}{\lambda T_{lyd} K} \hat{r} \quad (2.10)$$

Daugumoje technologinių apdirbimo procesų lazeris paviršių apdirba gana dideliais greičiais, kas yra pagrindas taip vadinamai galingai greitaveikiančio šaltinio apdirbimo technologijai. Laikoma, kad šiluminė banga, lygiagreti Ox ašies kryptimi, ne tokia svarbi lyginant su šiluminėmis bangomis Oy ir Oz kryptimis. Todėl turint truputį kitokį šilumos sklaidimo procesą greitai judančio taškinio šaltinio pusiau baigtiniame kūne, gauname tokią temperatūrinę išraišką:

$$T(y_0, z_0, t) = \frac{q}{2\pi K v t} e^{-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4at}}, \quad (2.11)$$

čia t laikas nuskaitomas nuo momento, kai šaltinis kerta $y_0 O z_0$ plokštumą, pervestą statmenai šaltinio ašies judėjimui per nagrinėjamą tašką A (2.2 pav. b); y_0, z_0 – taško A nejudamos koordinatės, sujungtos su kūnu ir neskiriamos nuo judančių koordinačių y ir z . Temperatūros plitimas pagal pateiktą formulę yra vaizduojamas 2.2 pav. a) (Борейшо 1992).

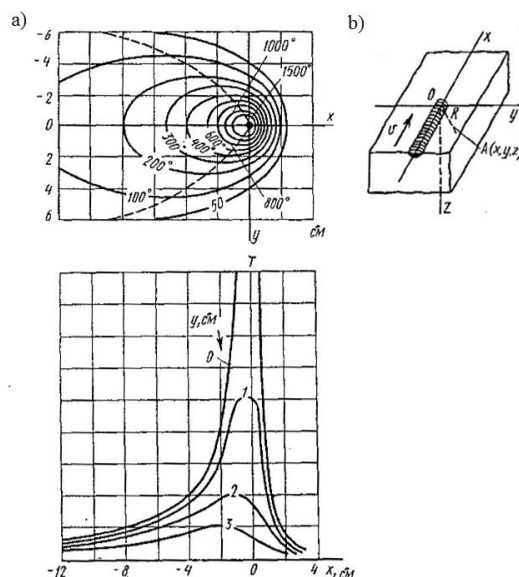


2.2 pav. a) Temperatūros pasiskirstymas, pagal 2.11 formulę, veikiant judančiam taškiniam šaltiniui; b) Judėjimo trajektorijos atvaizdavimas (Борейшо 1992)

Sugretinus gautą temperatūros lauką su temperatūros lauku, kuris išskirtas pagal 2.12 formulę, gausime, kad temperatūros reikšmės aušimo zonoje praktiškai vienodos. Svarbu nagrinėti šiluminio laidumo atvejus, kuomet energijos šaltinis juda esant pastoviai energijai tam tikra koordinačių sistema. Tokiu atveju naudojama išraiška:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi K R} e^{-\frac{vx}{2a} - \frac{vR}{2a}}, \quad (2.12)$$

čia R – erdvinis vektorius (2.3 pav. b) judančioje koordinačių sistemoje, t. y. atstumas A nuo koordinačių pradžios taško O , susijusiu su judamu šilumos šaltiniu. $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; x – taško A abscisė judančioje koordinačių sistemoje. Ši formulė tinka būtent nagrinėti temperatūros laukų pasiskirstymą Ox kryptimi. 2.3 pav. a) pateiktos izotermos xOy paviršiuje turi ovalinių kreivių pavidalą. Priešais šilumos šaltinį izotermos yra ištįsusios, o už šaltinio – perstumtos. Kaitinimo stadijoje temperatūra kyla taip pat greitai (Борейшо 1992).



2.3 pav. a) Izotermos ir temperatūros pasiskirstymas veikiant judančiam taškiniam šaltiniui; b) Judėjimo trajektorijos atvaizdavimas (Борейшо 1992)

2.2. Skaičiavimo duomenų paruošimas

Modeliavimas yra atliekamas „COMSOL *Multiphysics*“ programa skaičiuojant šiluminio laidumo lygtį sugertam Gausiniam impulsui. Pagrindui naudojama standartinė laidumo lygtis (Mackowski 2015):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + q, \quad (2.13)$$

čia ρ yra medžiagos tankis; κ – medžiagos šiluminis laidumas; q – šilumos tankis; T – temperatūra; C – šiluminė talpa ir t yra laikas. Modeliavimui naudojami lazerio parametrai pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Lazerio parametrai

<i>Parametrai</i>	<i>Reikšmė</i>
Lazerio bangos ilgis	532 nm
Spinduliuotės vidutinė išėjimo galia	2 W

2.1 lentelės tęsinys

Pluošto diametras fokusavimo metu (gilyje 1/e)	15 μm
Impulso energija	0,3 μJ
Pradinė temperatūra	26,85°C = 300 K
Impulso trukmė	10 ps
Atspindžio koeficientas	0,56 a.b.
Absorbcijos koeficientas	$6,3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$

Modeliuojamos plonos metalinės juostos (AISI 314) parametrai pateikiami 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Juostelės medžiagos parametrai

<i>Parametrai</i>	<i>Reikšmė</i>
Plieno tankis	7980 kg/m^3
Plieno šiluminė talpa	502 $\text{J/kg} \cdot \text{K}$
Plieno šiluminis laidumas	16,2 $\text{W/m} \cdot \text{K}$
Lydymosi temperatūra	1500 °C

Sudaromi du modeliavimai. Pirmajame yra modeliuojamas mažas juostelės plotas, kurio matmenys: plotis 20 mm, ilgis 1 mm, storis 0,5 mm (2.5 pav.). Antrojo metu plotis bei storis lieka tie patys, tačiau ilgis jau siekia 200 mm (2.9 pav.). Šie modeliai skirti pasižiūrėti temperatūros gradiento pasiskirstymui skirtingame mastelyje. Abiem atvejais lazeris juda vidutiniu $v_x = 2 \text{ mm/s}$ greičiu. Sprendžiant antrąjį modelį buvo naudojama tokia pat šiluminio laidumo lygtis. Sugerta lazerio spinduliuotė aprašoma Lamberto dėsnio (*Biomedicininiai lazeriai*):

$$Q = \alpha \exp(-\alpha z), \quad (2.14)$$

čia α medžiagos absorbcijos koeficientas. $I = I(x, y, t)$ bandinio paviršiumi judantis pluošto erdvinis skirstinys, kuris paskaičiuojamas (*UAB „Precizika Metrology“* 2015):

$$I(x, y, t) = I_0 e^{-2(x-v_x t)^2/w_{x0}^2} \left[flsmhs \left(y + \frac{w_{y0}}{2}, w_{x0} \right) - flsmhs \left(y - \frac{w_{y0}}{2}, w_{x0} \right) \right], \quad (2.15)$$

čia I_0 smailinis intensyvumas pluošto centre; v_x pluošto skenavimo greitis; w_{x0} pluošto radiusas x kryptimi; w_{y0} pluošto radiusas y kryptimi; *flsmhs* – stačiakampio tipo funkcija, apribojanti pluoštą y kryptimi. Smailinis intensyvumas pluošto centre paskaičiuojamas taip (*UAB „Precizika Metrology“* 2015):

$$I_0 = \frac{2P}{\sqrt{2\pi} w_{x0} w_{y0}} \quad (2.16)$$

Juostos aušimas apskaičiuojamas panaudojant Niutono aušimo dėsnį:

$$\frac{dQ}{dt} = S \cdot h \cdot (T_{\infty} - T), \quad (2.17)$$

čia h konversinis šilumos laidumo koeficientas (naudojamas natūralios konvekcijos koeficientas, kuris lygus $0,5\text{--}30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$); S bandinio paviršiaus plotas; T_{∞} temperatūra toli nuo paviršiaus; T objekto temperatūra. Suformulavus išvestinę gauname nunešamą galią, tenkančią ploto vienetui:

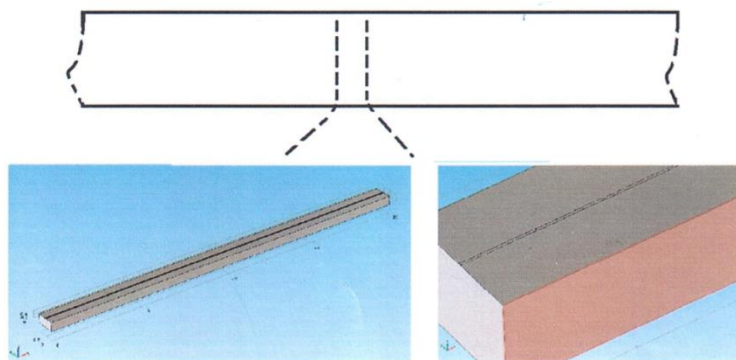
$$q = h \cdot (T_{\infty} - T) \quad (2.18)$$

Juostos temperatūra priklauso nuo erdvinės koordinatės ir laiko. Tačiau pakankamai ilgos juostos kaitinimas nusistovi judančioje koordinačių sistemoje. Jos pailgėjimą per nusistovėjimo laiką galima paskaičiuoti pagal tokią formulę:

$$\Delta L = \beta \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta T(x) dx, \quad (2.19)$$

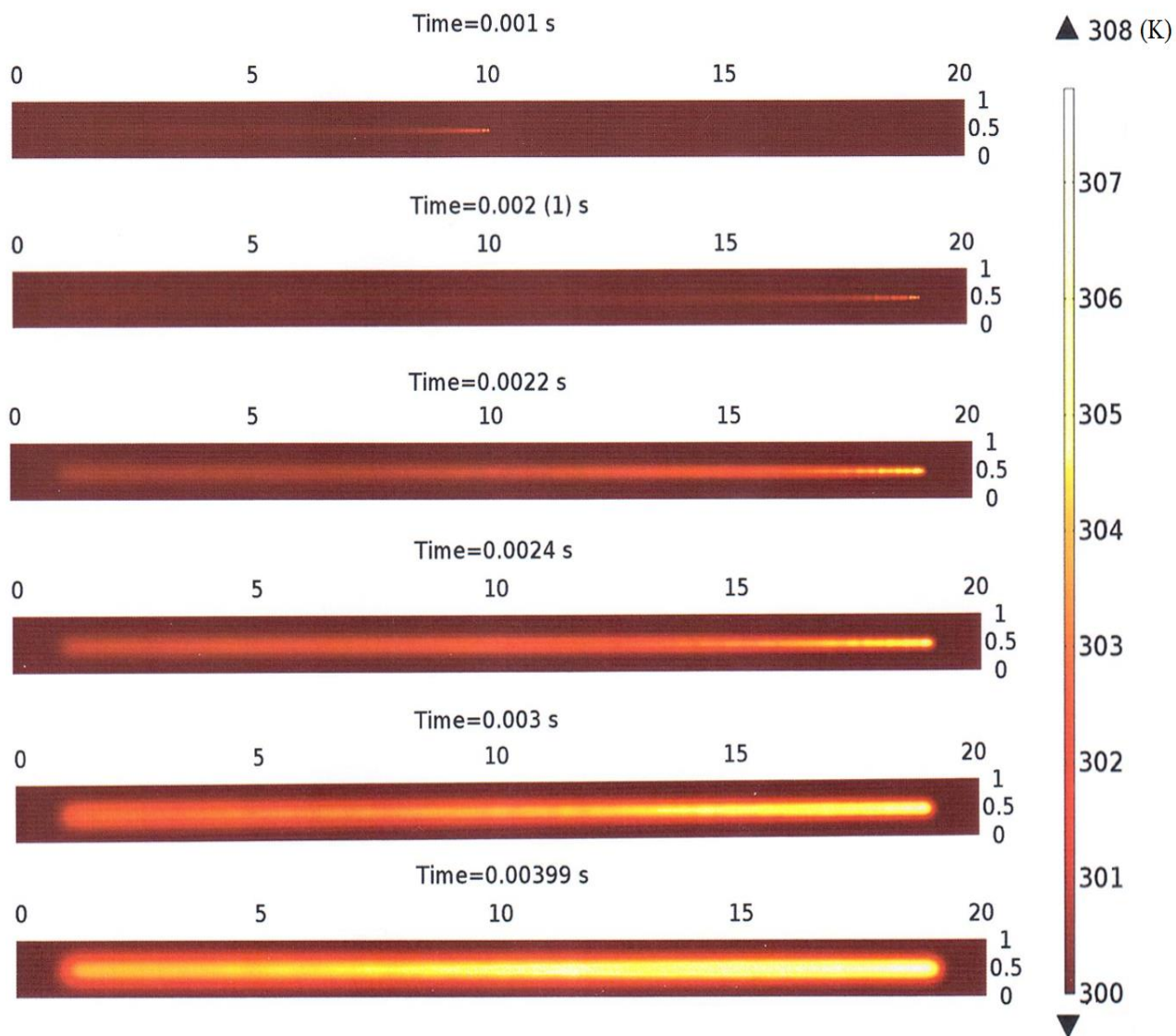
čia ΔL juostelės ilgio pokytis; β terminis plėtimosi koeficientas; $\Delta T(x)$ juostelės temperatūros pokytis išilgai juostos; dx pakankamai mažas juostos ilgio intervalas.

2.3. Skaičiavimas pagal modelius, rezultatai



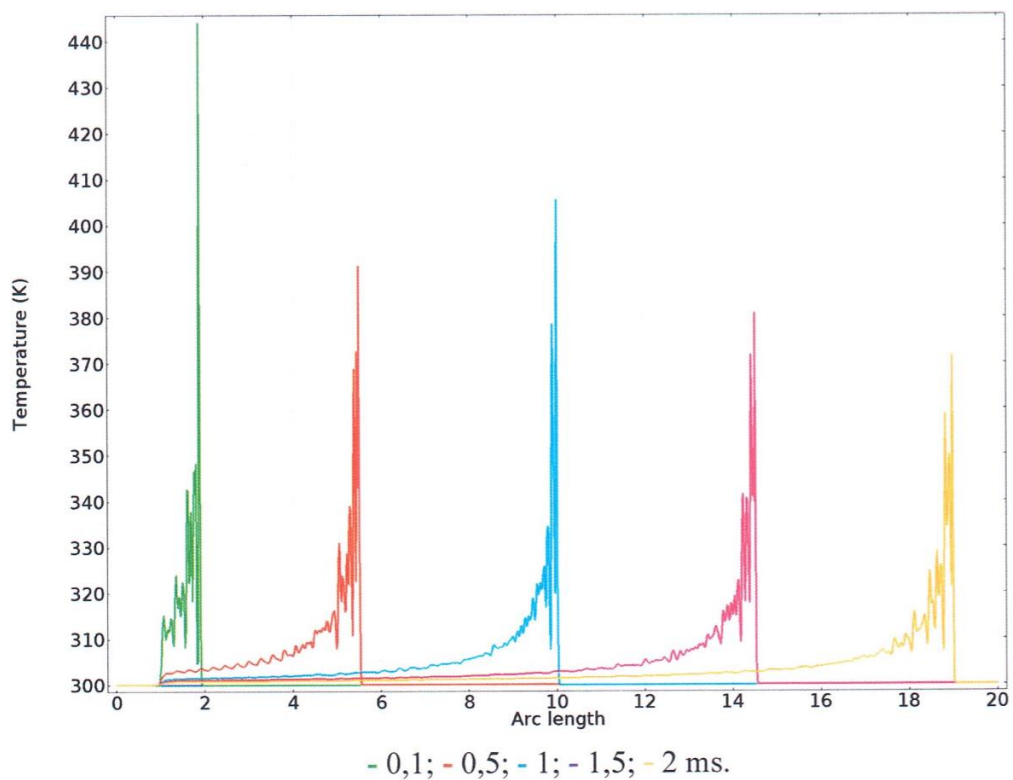
2.4 pav. Juostelės modelis

Kaip jau buvo minėta, modeliavimui bus naudojamas tik labai mažas juostos plotas tam, kad išsiaiškinti temperatūros pasiskirstymą formuojant vieną rastrą. Modelyje sukurtas judantis 9 m/s greičiu sugertos lazerio spinduliuotės šilumos šaltinis. Rezultatuose pateikimas vieno režio formavimo ir laiko tarpo tarp režių grafiniai vaizdai. Vieno režio formavimo trukmė ir laiko tarpas tarp vieno režio pabaigos ir kito pradžios yra 2 ms arba 0,002 s.

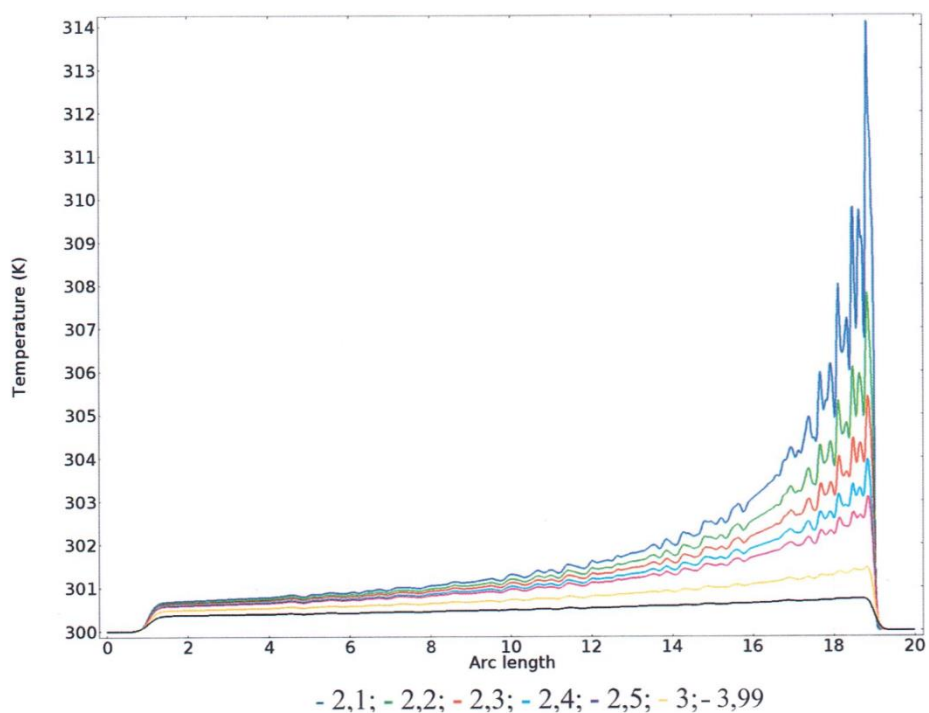


2.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas rastro formavimo metu ir po jo (*FMTC ataskaita*)

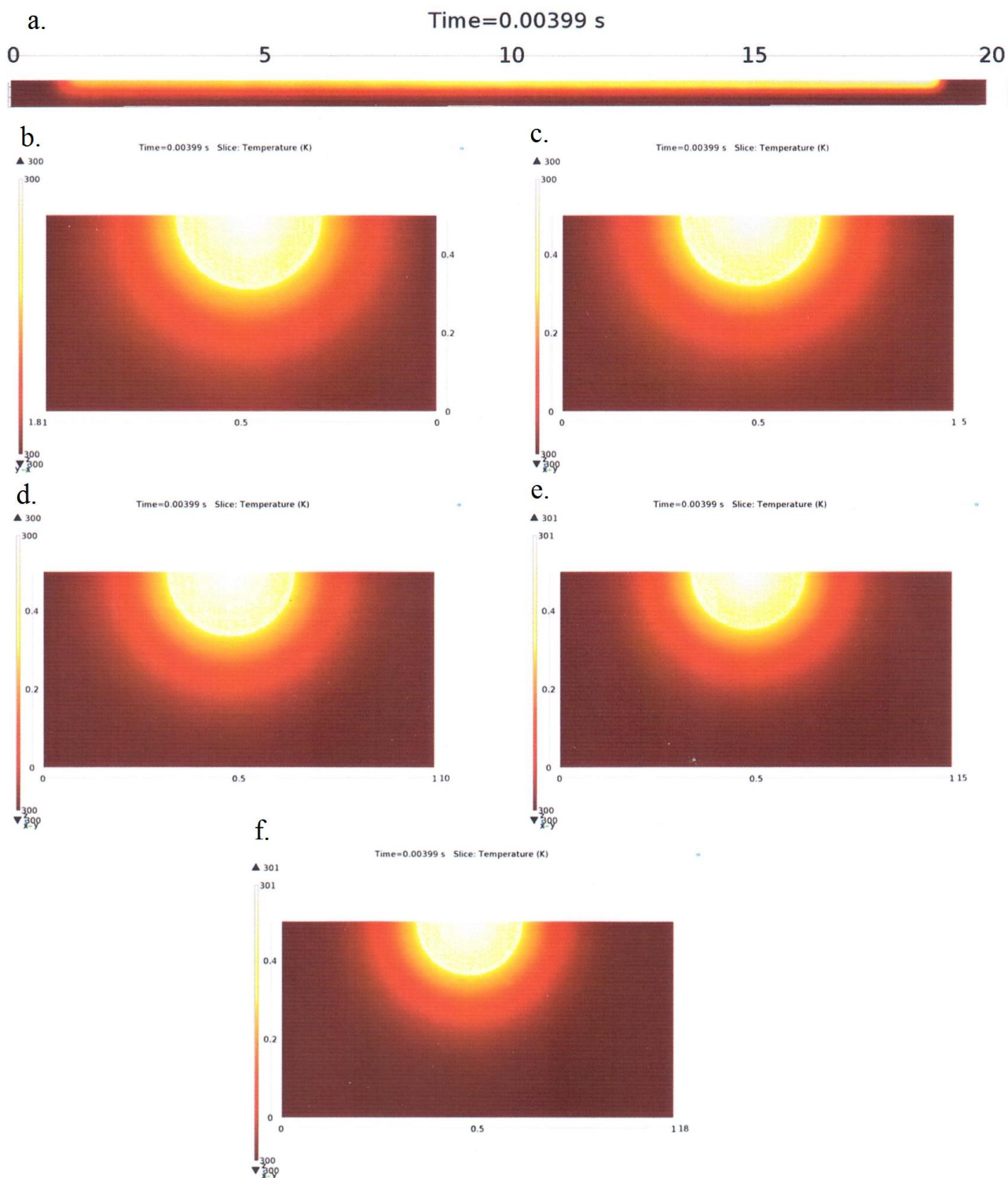
Modeliavimu nustatytas šiluminio lauko dydis ir jo judėjimas atskiro rastrinio elemento formavimo metu, vidutinė skalės temperatūra ir jos susilyginimo su aplinkos temperatūra trukmė formuojant užduoto ilgio skalės atkarpą, terminių deformacijų dydis išilgai skalės. Modeliavimo rezultatų iliustracijai 2.5 pav.



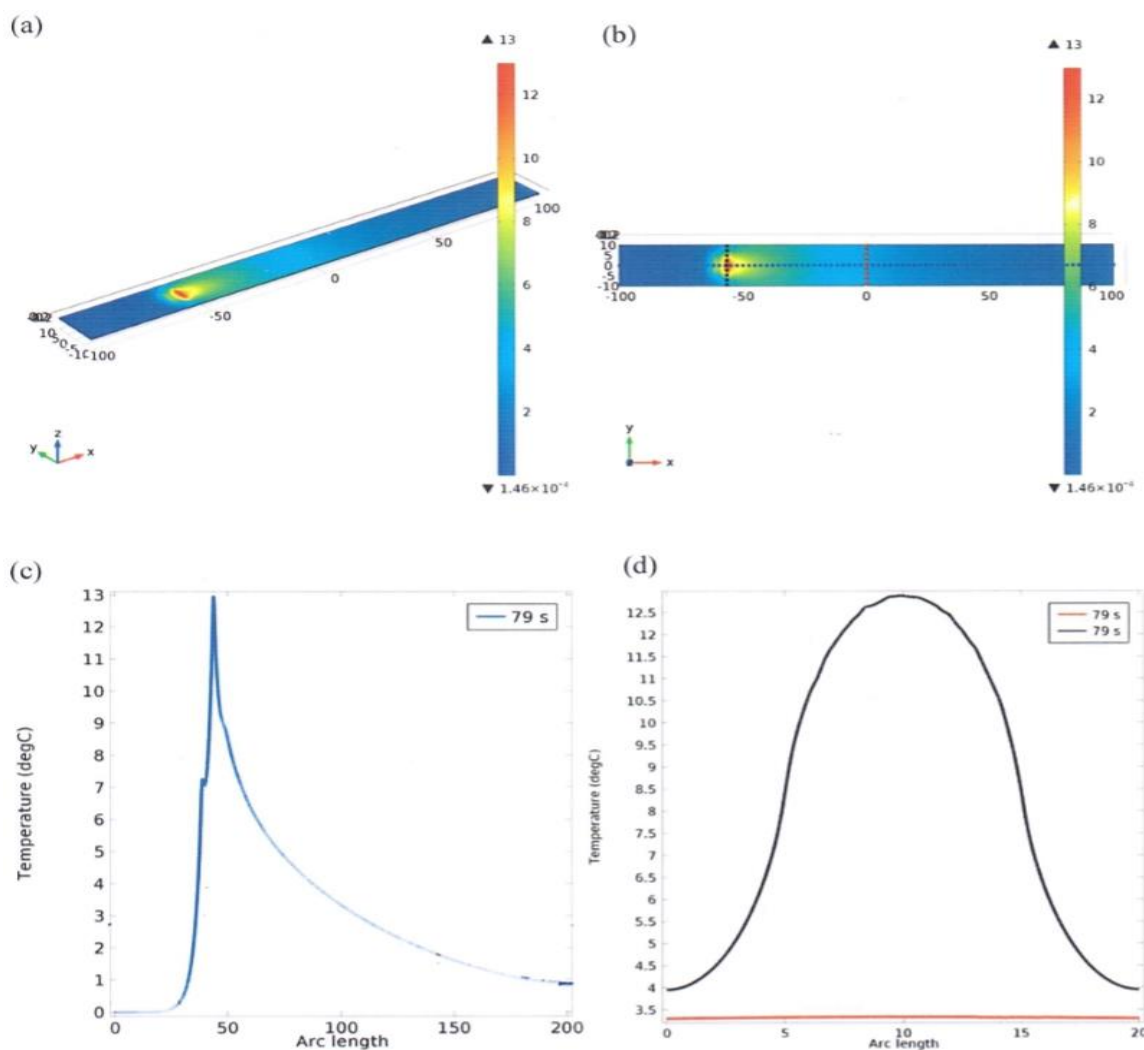
2.6 pav. Paviršiaus temperatūra režio centre skirtingais laiko momentais: $0,1 \div 2$ ms. Vyksta formavimas (FMTC ataskaita)



2.7 pav. Paviršiaus temperatūra režio centre skirtingais laiko momentais: $2,1 \div 3,99$ ms. Vyksta aušinimas (FMTC ataskaita)



2.8 pav. Segmento skerspjūvio temperatūros lauko grafikai: a) z x plokštumoje; toliau visi kiti z y plokštumoje, tik skirtingose x padėtyse: b) 1,8 mm, c) 5 mm, d) 10 mm, e) 15 mm, f) 18 mm
(FMTC ataskaita)



2.9 pav. Natūralia oro konvekciija aušinamos liniuotės kaitinimo dinamikos temperatūros profiliai: a) 3D temperatūros profilis; b) 2D temperatūros profilis; c) 1D temperatūros profilis x kryptimis; d) 1D temperatūros profilis y kryptimis. Grafikuose nurodytas 0°C yra lygus 20 °C (*FMTC ataskaita*)

2.9 pav. atvaizduoja jau kito tipo modeliavimą, t. y. antrasis modelis, kuomet ilgis jau siekia 200 mm, pradinė temperatūra yra 20°C. Esant natūraliai konvekcijai apdirbama juosta yra aušinama ją supančių oro srovių, kurios atsiranda dėl šalia esančių įrenginių, tokių, kaip aerostatiniai guoliai ar termokonstacinėje patalpoje esančių temperatūros nevienodumų. Tokiu atveju temperatūra eksponentiškai gęsta tolstat lazeriui. Juosta atšąla iki pradinio 20 °C laipsnio per 150 mm intervalą. Natūraliai aušinamos absoliutinės juostos pailgėjimas apskaičiuojamas pasinaudojus (2.19) formule ir suintegravus 2.9 pav. c) duomenis gauname, kad dėl terminio plėtimosi 200 mm juosta pailgėja 9,7 μm.

3. ĮRENGINIO VIDINIŲ IR IŠORINIŲ TRIKDŽIŲ SUKELIAMŲ TEMPERATŪROS GRADIENTŲ TYRIMAS

3.1. Tyrimo uždaviniai ir metodai

Tyrimai bus atliekami pasinaudojus eksperimento metodu. Kad būtų pasiektas tikslas, keliami tokie uždaviniai:

1. Surinkti pirmajam eksperimentui – vidinių, lazerio, temperatūros gradientų pasiskirstymui nustatyti – naudojamą aparatūrą ir nustatyti tinkamiausią eksperimento planą;
2. Atlikti eksperimentą pagal nustatytą planą ir apdoroti gautus duomenis;
3. Surinkti antrajam eksperimentui – išorinių, aplinkos, temperatūros gradientų pasiskirstymui nustatyti – naudojamą aparatūrą ir nustatyti tinkamiausią eksperimento planą;
4. Atlikti eksperimentą pagal nustatytą planą ir apdoroti gautus duomenis;
5. Gautus duomenis panaudoti palyginimui su modeliavimu ir kompensacinio dydžio nustatymui.

3.2. Vidinių trikdžių tyrimo planas bei aparatūra

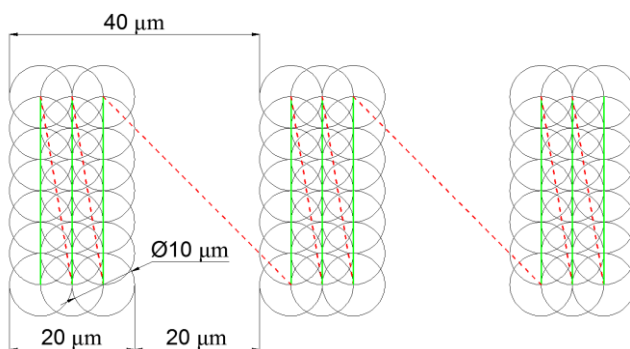
Eksperimento metu siekiama nustatyti temperatūros gradientus, jų pasiskirstymą ir dydį rastro formavimo zonoje, veikiant lazerio spindulio energijai formuojant rastrus.

Tyrimams atlikti panaudojama tokia eiga:

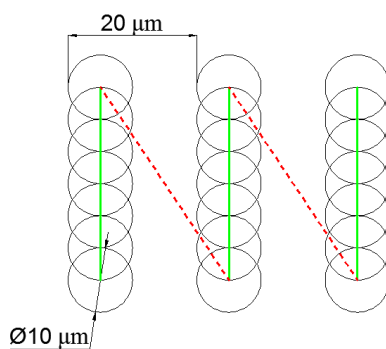
1. Matuojamas temperatūros kitimas keliuose (3–4) metalinės juostos taškuose, esančiuose galimai arčiau formuojamo rastro.
2. Rastro formavimas ir temperatūros kitimo matavimas atliekami 3 kartus esant pasikartojimo sąlygoms. Matavimo rezultatai pateikiami grafiniu temperatūros priklausomybės nuo laiko pavidalu.
3. Pirmojo eksperimento metu lazerio spindulys eina per jutiklius, kuomet jutikliai yra viršuje. Poveikių pradžios ir temperatūros matavimo pradžios laikai yra nesinchronizuoti. Sinchronizuojamas lazerio poveikių pradžios ir temperatūros matavimo pradžios laikai antrojo – pakartojamojo eksperimento metu.
4. Eksperimentas pakartotas du kartus, pirmą ir antrą kartą atliekant po 6 skirtingus bandymus.
5. Lazerio spindulio ir juostos santykinis judesys realizuojamas skeneriu, lazerio spindulį pasukant apie rastro ašiai statmeną ašį.
6. Ruošinys bazuojamas dviejuose taškuose taip, kad jis turėtų minimalų kontaktą su staliuko pagrindu;

7. Lazero spindulio apdirbimo ilgiai: pirmojo eksperimento metu 50 mm, atrojo 48 mm. Temperatūros rodmenų nuskaitymo periodas lygus 0,1 s.

8. Bandymai atliekami formuojant du dažniausiai naudojamus rastro žingsnius 40 μm ir 20 μm bei ištiesai paveikiant ruošinio paviršių – sudarant foną. 1 mm atliekami 3333 impulsai. Lazero spindulio pluošto skersmuo lygus 10 μm . Formuojant rastrą, skenavimo žingsnis išilgai rastro ašies lygus 5 μm . Lazero judesio trajektorija yra atvaizduojama 3.1 ir 3.2 paveiksle:



3.1 pav. 40 μm rastro formavimo schema



3.2 pav. 20 μm rastro formavimo schema

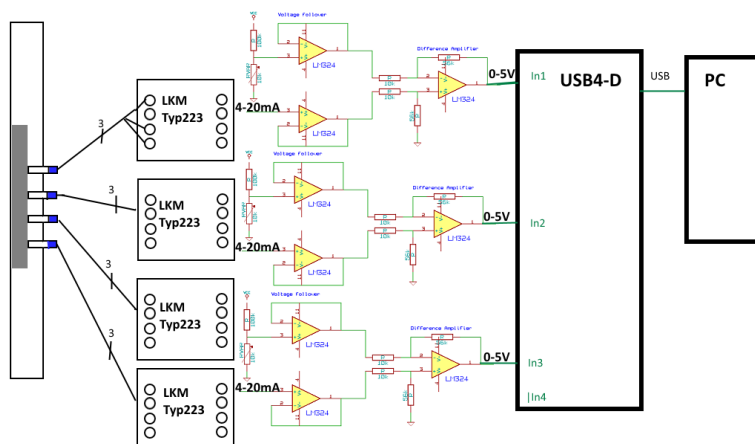
9. Užduodami rastrų formavimo parametrai nurodyti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Lazero judesio greičio ir laiko parametrai

Formavimas	Lazero slinkimo greitis		Rastrų formavimo laikas, s.
	Išilgai juostos	Skersai juostos	
40 μm	0,98 mm/s	9 m/s	48
20 μm	7,1 mm/s	9 m/s	7
Fonas	2,1 mm/s		24

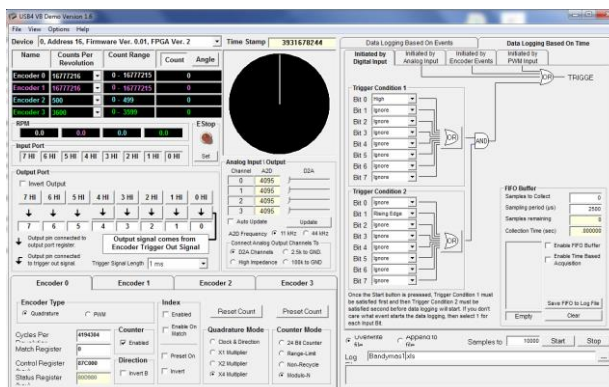
Bandymams naudojama „Westig“ 1.4028 Mo nerūdijančio plieno juostos ruošinys, kurio matmenys yra 250x15,4x0,5 mm. Visų bandymų metu juostelė buvo fiksuota, o judesį išilgai ir skersai atliko lazerio spindulys.

Visiems temperatūros tyrimams yra naudojama ta pati matavimo schema, kuri susideda iš tokių elementų: kompiuterio, „USB4-D“ jutiklių duomenų surinkimo įrenginio, mažos galios kvadratinėse operaciniuose stiprintuvuose LM324, LKM 223 temperatūros imtuvo, platininių PT100 temperatūros jutiklių bei skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“.



3.3 pav. Temperatūros tyrimams naudojama duomenų rinkimo ir kaupimo schema

Duomenų surinkimo funkciją atlieka „USB4-D“, kuris per USB2.0 laidą yra prijungiamas prie kompiuterio bei per jį yra valdomas atskira programine įranga, kuri yra skirta būtent šiam įrenginiui. USB4-D suteikia priėjimą prie 4 pavienių keitiklio kanalų, 4 PWM (angl. *pulse width measurement*) matavimo kanalų, 8 bitų skaitmeninio įėjimo porto, 8 bitų skaitmeninių išvesties prievadų, 4 analoginių įvesties kanalų (12 bitų A/D) ir 4 analoginio išėjimo kanalų (12 bitų D/A). USB4-D turi 32MB FIFO buferį, kuris užtikrina, kad perimti duomenys nebus prarasti dėl atsirandančių vėlavimų, kuriuos gali sąlygoti kompiuterio komponentai.



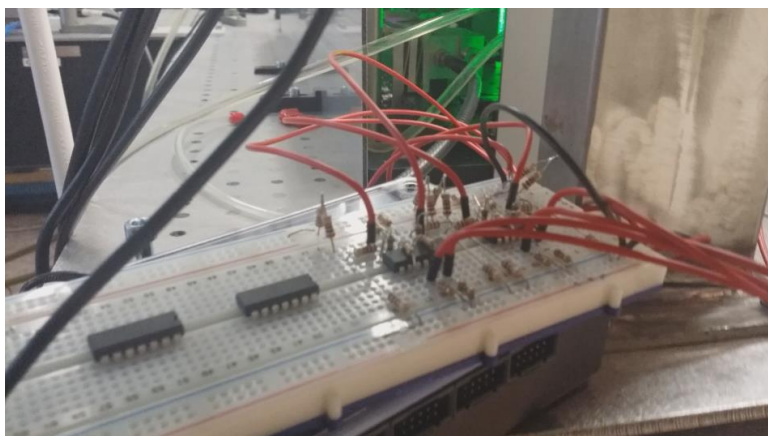
3.4 pav. „USB4-D“ V8 programos langas

Programinės įrangos pagalba galima keisti duomenų fiksavimo dažnį t. y. tiek ir laiką, tiek ir duomenų kiekį.



3.5 pav. „USB4-D“ duomenų surinkimo įrenginys

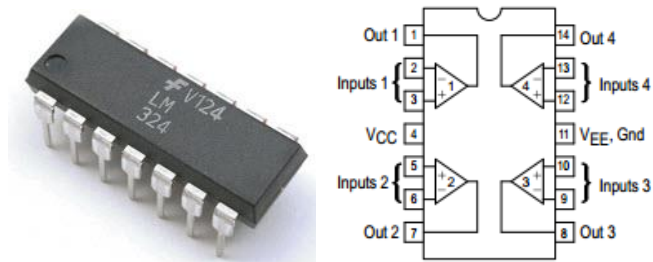
Kadangi gaunamos duomenų reikšmės yra mažos, tam yra panaudojami kvadratūriniai operaciniai stiprintuvai LM324, kurie susideda iš keturių nepriklausomų, aukšto naudingumo, vidinio dažnio kompensavimo operacinių stiprintuvų, kurie yra specialiai sukonstruoti dirbti nuo vieno plačios įtampos diapazono energijos šaltinio. Duomenų netikslumas nepriklauso nuo maitinimo įtampos dydžio. Tyrimo metu jie yra sumontuoti ant montažinės plokštės.



3.6 pav. LM324 sumontuota ant montažinės plokštės

3.2 lentelė. Kvadratūrinio operacinio stiprintuvo LM324 charakteristikos

Parametrai	Reikšmės
Įėjimo įtampa	$-0,3V \div +32V$
Įėjimo srovė	50mA
Temperatūros diapazonas	$-25^{\circ}C \div +85^{\circ}C$
Pralaidumas	1MHz
Įvesties įtampos kompensavimas	7mV
Įvesties srovės kompensavimas	50nA
Maitinimo atmetimo santykis	min. 60dB



3.7 pav. LM324 bendras vaizdas ir vidinė schema

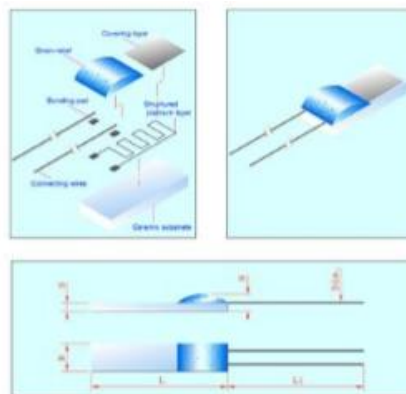
Temperatūros imtuvai LKM 223 yra skirti būtent platininiams PT100 temperatūros jutikliams. Atitinka DIN EN 60751 standartą. Jis konvertuoja temperatūriškai priklausomą jutiklio varžos signalą į standartinį, analoginį, 4...20 mA signalą. Temperatūros diapazonas skiriasi nuo tam tikro modelio porūšio.

3.3 lentelė. Temperatūros imtuvo LKM 223 charakteristikos

Parametrai	Reikšmės
Reakcijos laikas	<0,1s
Tiesiškumo paklaida	<0,1%
Temperatūros diapazonas	-40°C ÷ +85°C
Matavimo srovė	0,8 ÷ 1mA
Įėjimas	3 PT100
Įtampa	10 ÷ 35Vdc
Emisija	EN 50081-1



3.8 pav. Temperatūrinis imtuvas LKM 223 (PT100 temperature transmitter)



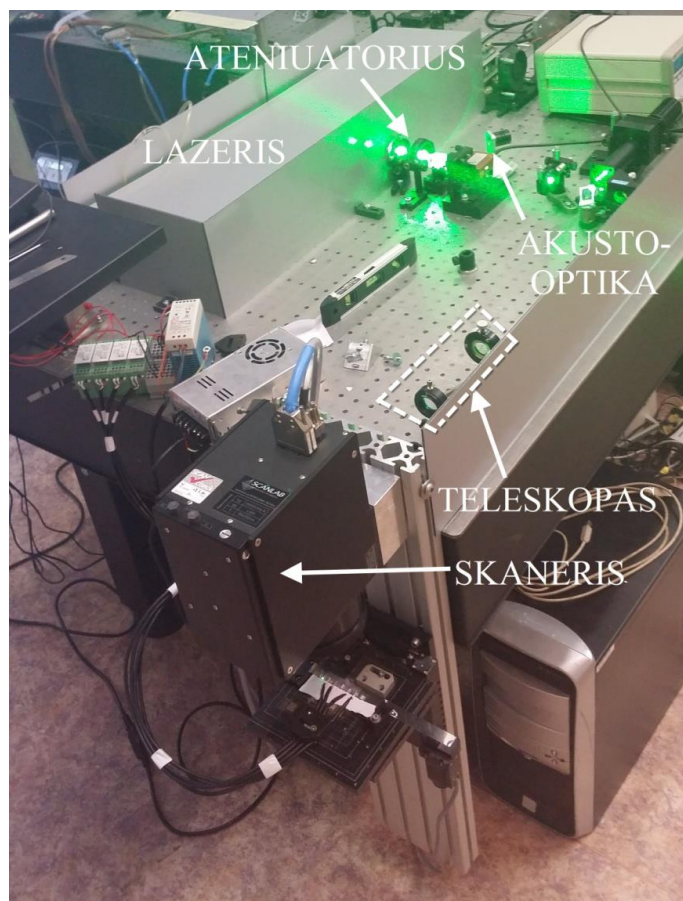
3.9 pav. Platininis PT100 temperatūros jutiklis (*Platinum – foil temperature sensors to EN 60 751*)

3.4 lentelė. Platininio PT100 temperatūros jutiklio charakteristikos

Parametrai	Reikšmės
Temperatūros diapazonas	$-50^{\circ}\text{C} \div +500^{\circ}\text{C}$
Šalčio varža	100Ω
Savaiminis įšilimas	$< 0,5^{\circ}\text{C}/\text{mW}$
Temperatūros reakcija	0,1s
Stabilumas	$\pm 0,05\%$

Tyrimams sukurtas stendas (3.10 pav.), kurio schemą su pagrindinėmis komponentėmis sudaro:

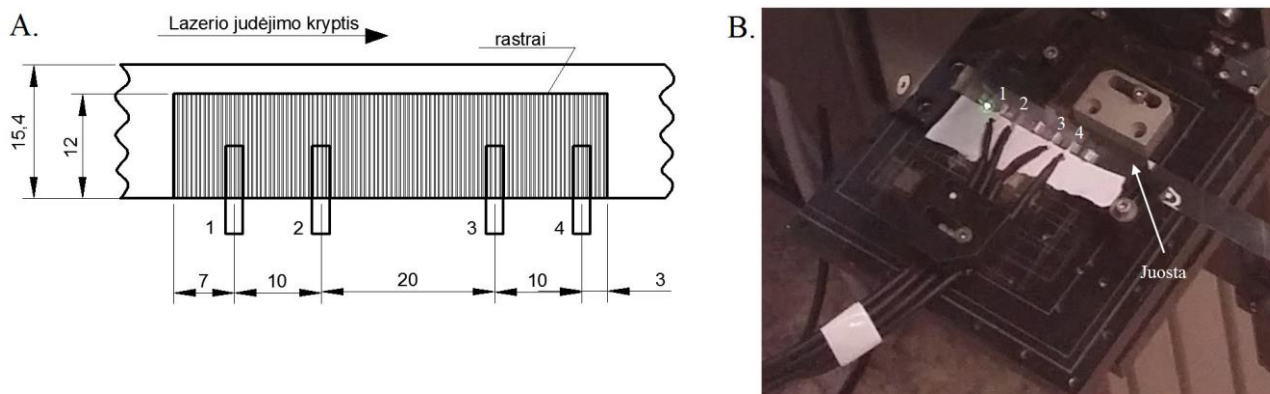
1. Pluošto valdymas: Akusto – optika AA optoelectronics MCQ110–A2–VIS;
2. Teleskopas: 6.6x(+200+30) + 4x Anamorphic Prism (Thorlabs) PS883–A;
3. Pluošto pozicionavimas išilgai ir skersai: „ScanLab IntelliSCAN 14“;
4. Lazeris yra sukurtas būtent šiam projektui ir jo parametrai: impulsinis (10 pikosekundžių) lazeris su optine išėjimo galia 4 W; YAG diodas formuoja vieną bangos ilgį, o vėliau dirbama tik su antra jo harmonika; deginimas (paviršiaus struktūros sujaukimas) vyksta žalios šviesos spektre, kur išėjimo bangos ilgis 532 nm, impulsų dažnis apie 7,5 MHz, impulso energija 0,3 μJ.



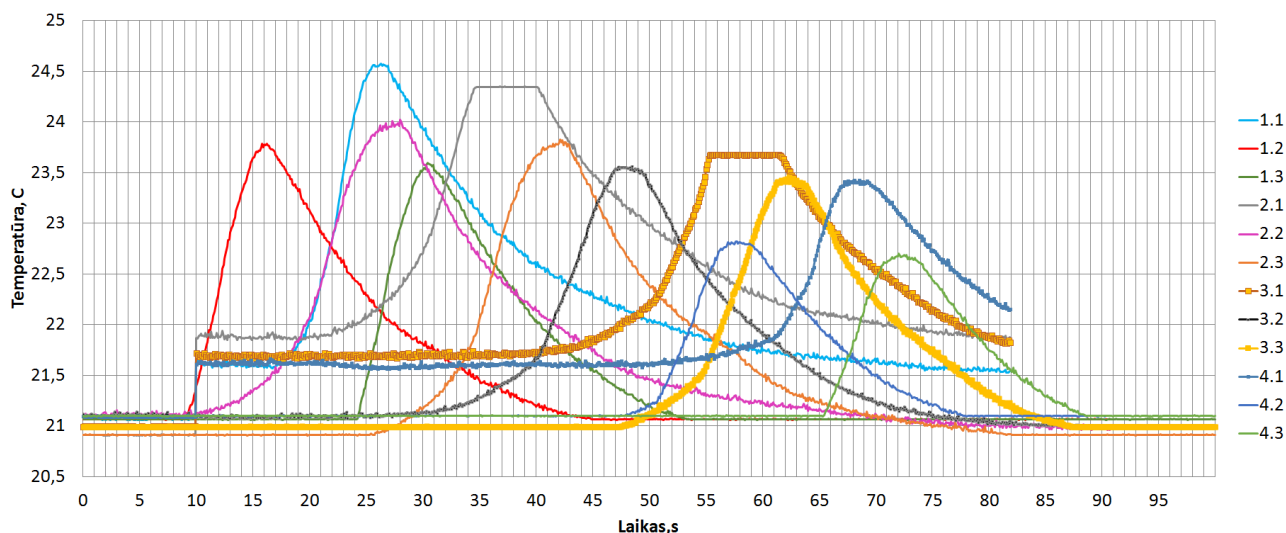
3.10 pav. Lazerio spindulio poveikio ruošinio temperatūros pokyčiui tyrimo stendo schema

3.3. Eksperimentiniai vidinių temperatūros gradiento trikdžių tyrimai

Atliekamas eksperimentas, kurio metu bandymai kartojami šešis kartus esant skirtingiems parametrams. Pirmojo bandymo metu jutikliai buvo išdėstyti 3.11 pav. nurodyta tvarka, t. y. paliekant tarpelį tarp dviejų porų. Jutikliai su juostele yra prispaudžiami prie pagrindo metalinėmis plokštelėmis. Tam, kad jutikliai geriau laikytųsi specialiose ant juostelės suformuotose vietose, yra panaudojamos kanceliarinės gumos atplaišos, formuojamas $40\ \mu\text{m}$ rastras.



3.11 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas $40\ \mu\text{m}$ rastras. Jutikliai su tarpeliu, viršuje

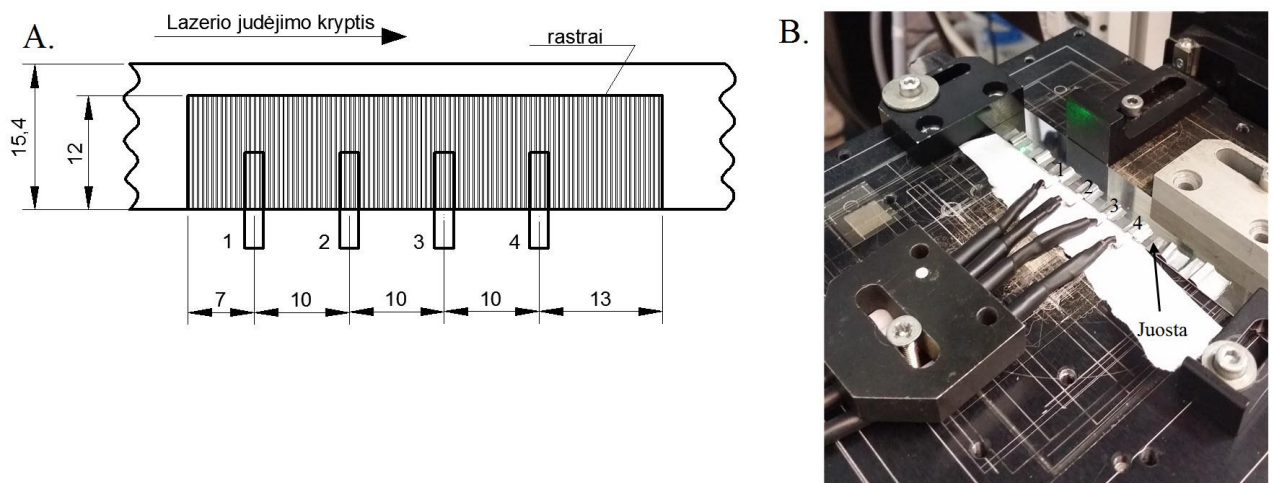


3.12 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrą, jutikliai viršuje

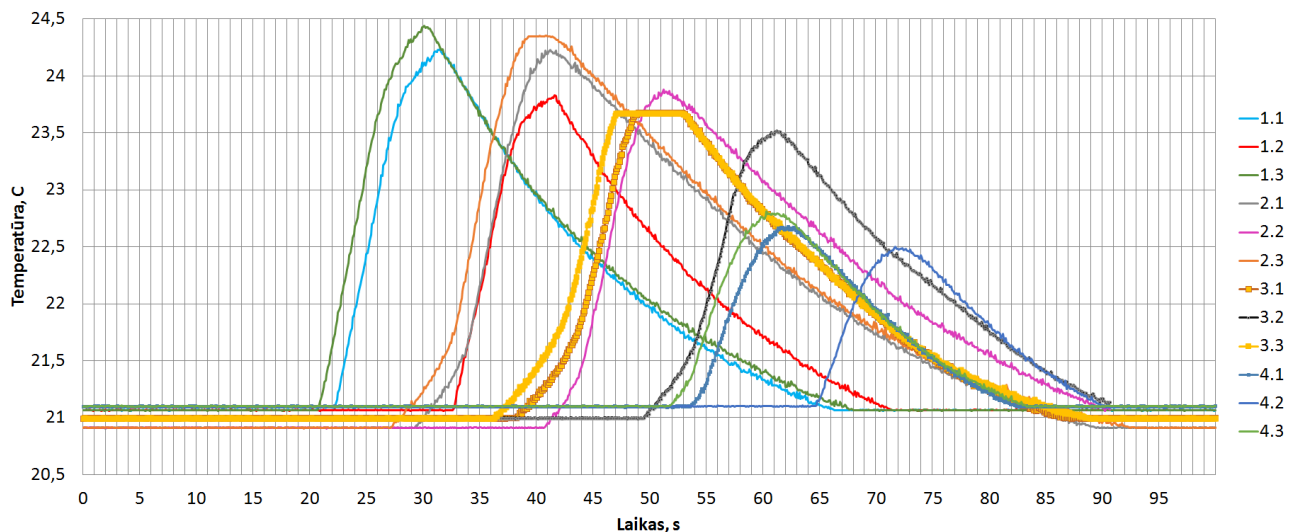
Šio bandymo metu lazerio spindulys juda per jutiklius, tačiau tai yra nepriimtina duomenų tikslumui vertinti; lazerio judesys nėra sinchronizuotas su duomenų nuskaitymu; kartojimo duomenys nesutampa ir negalima gauti vientisų bangų tose pačiose laiko atskaitose. Taip pat duomenų ribos jutikliuose yra sukalibruotos per mažos, todėl atsiranda viršūnių „nupjovimai“ antrojo ir trečio jutiklio pirmajame kartojime. Aukščiausia temperatūra yra fiksuojama ties 24 – 24,6 $^{\circ}\text{C}$.

PASTABA. Visuose „Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose <...>“ grafikuose naudojamas tas pats jutiklių ir kartojimų žymėjimas, kuris aiškinamas tokia tvarka: 1.1 – pirmas jutiklis, pirmas kartojimas; 1.2 – pirmas jutiklis, antras kartojimas; 1.3 – pirmas jutiklis, trečias kartojimas. Su likusiais jutikliais ir kartojimais naudojama ta pati sistema.

Antrojo bandymo metu jutikliai yra išdėstomi tvarka, parodyta 3.13 pav., t. y. jau nepaliekant tarpelio. Juostelės padėtis nėra keičiama, pakeičiama tik jutiklių padėtis. Jutikliai yra montuojami be gumelių, nes yra labai sunku jas kartu įdėti su jutikliais, formuojama 40 μm rastras.



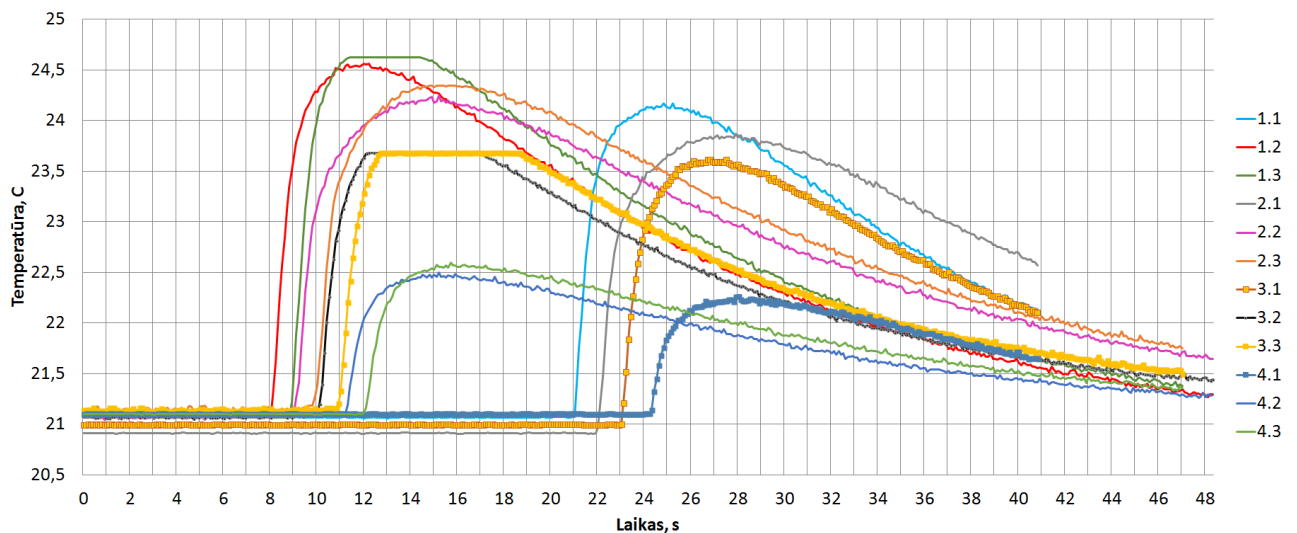
3.13 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras



3.14 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrą, jutikliai viršuje, jų padėtis perstumta

Atliekant šį bandymą duomenų fiksavimo pradžios sutampa, išskyrus antrą kartojimą. Maksimali pasiekta temperatūra siekia taip pat 24,5 $^{\circ}\text{C}$, tačiau pasiekus ketvirtą jutiklį, temperatūra nukrenta iki 22,5 $^{\circ}\text{C}$, paskutinis jutiklis temperatūros maksimumą fiksuoja esant tik ties 63 sekundžių riba. Iš antrame eksperimente gautų rezultatų matyti, kad lazerio spindulys juda greičiau nei šilumos banga, lazerio veikimas sustabdomas ties 48 sekunde, duomenis ketvirtas jutiklis pradeda fiksuoti 62 sekundę. Atstumai tarp jutiklių temperatūros fiksavimo pradžių yra apie 12 sekundžių.

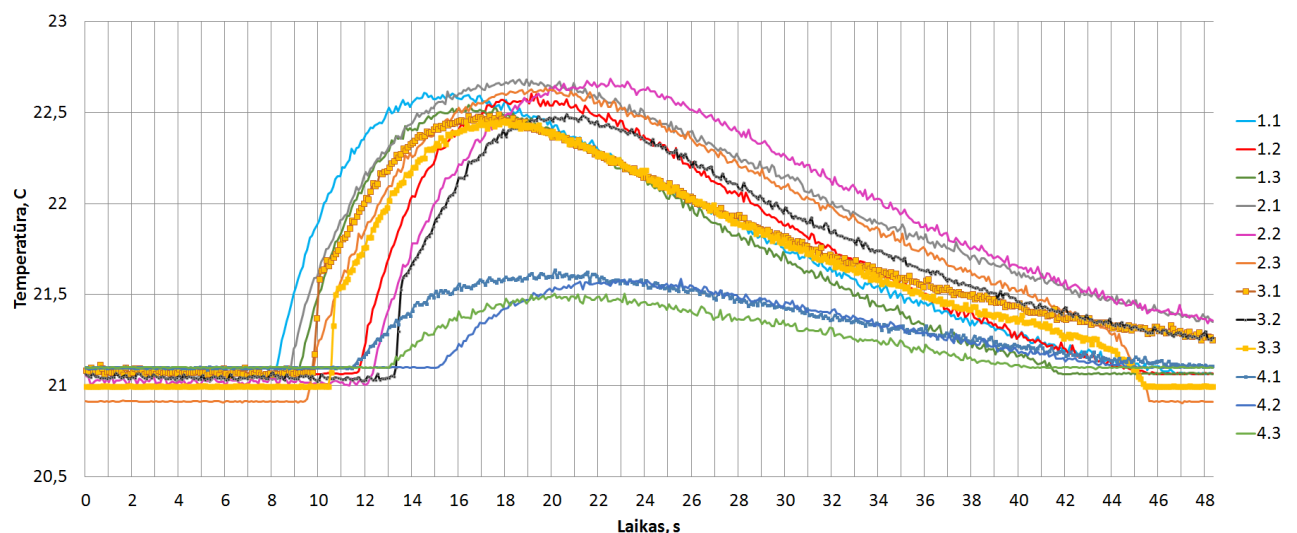
Trečiojo bandymo metu rastro formavimas pakeičiamas į 20 μm . Visi bandymo parametrai yra analogiški antrajam bandymui, t. y. juostelės padėtis, tvirtinimas, jutiklių išdėstymas ir t.t.



3.15 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastras, jutikliai viršuje

Temperatūros maksimumas pakyla labai nežymiai, 0,1 $^{\circ}\text{C}$ nuo antro bandymo, panašiai į pirmą bandymą. Lyginti tris kartojimus yra netikslinga, nes pirmasis yra pasistūmėjęs į priekį, bet antrasis ir trečiasis yra gana tikslūs. Pastebime, kad temperatūra palaipsniui mažėja einant prie kiekvieno iš jutiklių nuo 24,5 $^{\circ}\text{C}$ iki 24 $^{\circ}\text{C}$ ir staigiai krenta iki 22,5 $^{\circ}\text{C}$ panašiai kaip ir antrajame bandyme, tačiau atstumai tarp jutiklių rezultatų yra mažesni, apie 1,6 sekundės, nes lazerio spindulio judesio greitis yra žymiai didesnis. Lazeris jau yra baigęs apdirbimo procesą ir tik po 1,5 sekundės pirmas jutiklis pradeda fiksuoti temperatūros pokytį. Fiksavimo laiko neužtenka pilnai pasiekti pradinės temperatūros.

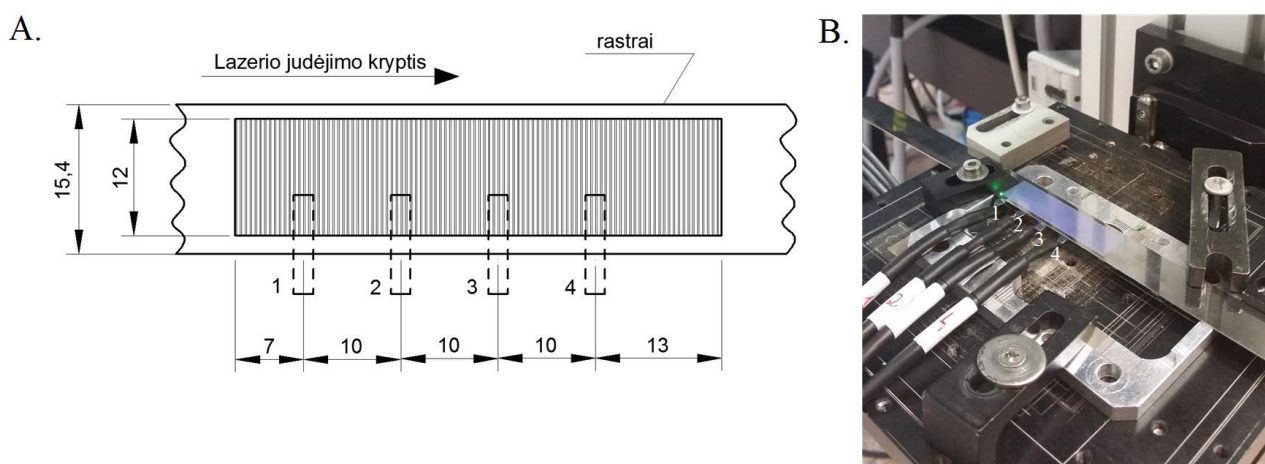
Ketvirto bandymo metu paimama nauja paruoša, rastro formavimas paliekamas toks pats, 20 μm . Parametrai lieka tie patys kaip ir trečio bandymo, tačiau šį kartą lazeris yra pastumiamas į priekį, t. y. formavimas yra atliekamas ant juostelės pradžios, prieš jutiklius.



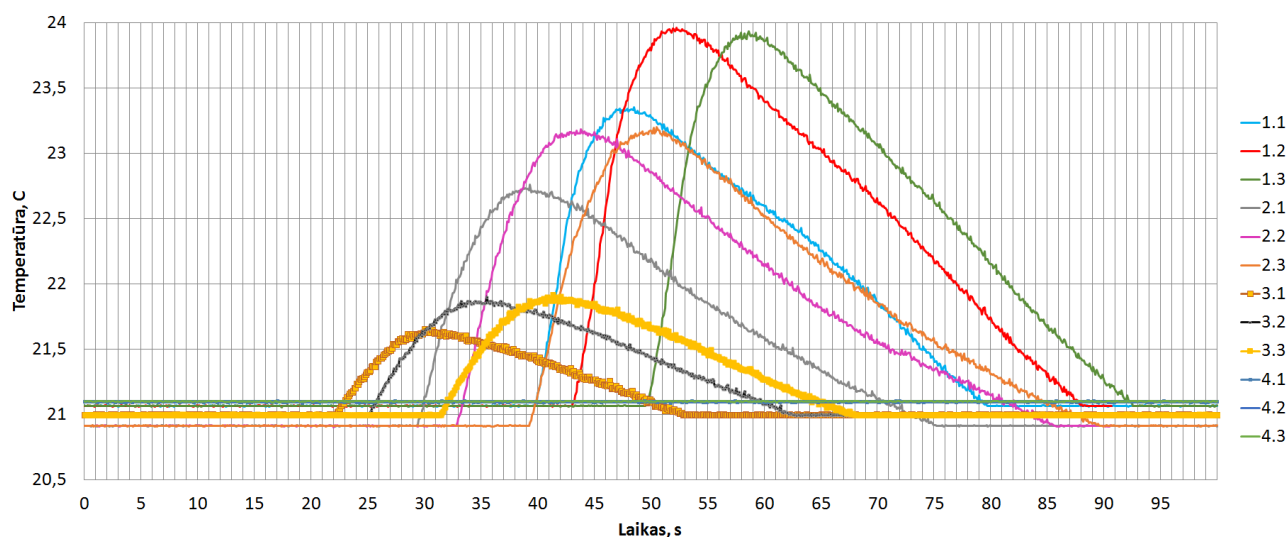
3.16 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastras, pakeistas ruošinys

Temperatūros maksimumas yra daug mažesnis lyginant su pirma buvusiais bandymais, 22,6 °C. Bangos plotis laiko atžvilgiu yra didesnis, imant atskaitos tašką 22,3 °C, jis siekia apie 10 sekundžių. Nors formavimas atliekamas juostelės pradžioje, šilumos banga pasiekia ir ketvirtą jutiklį, temperatūra susilpnėjusi iki 21,6 °C bei atvėsimo greitis yra mažesnis.

Penkto bandymo metu juostelė yra apverčiama, formavimas pakeičiamas į 40 μm. Jutikliai tvirtinami be gumelių. Lazerio formavimo padėtis grąžinama į trečio bandymo padėtį, t. y. lazerio spindulys eina per jutiklius, kurie yra apačioje. Jutikliai ir juostelė yra pakeliami ant plokštelės, kaip parodyta 3.13 pav., juostelė yra pastatoma taip, kad ji liestųsi tik dviejuose tvirtinimo taškuose. Dėl techninių kliūčių ketvirtas jutiklis nefiksuoja duomenų pokyčio (išsitiesinė linija).



3.17 pav. Juostos veikiant lazario spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 40 μm rastras, juostelė apversta



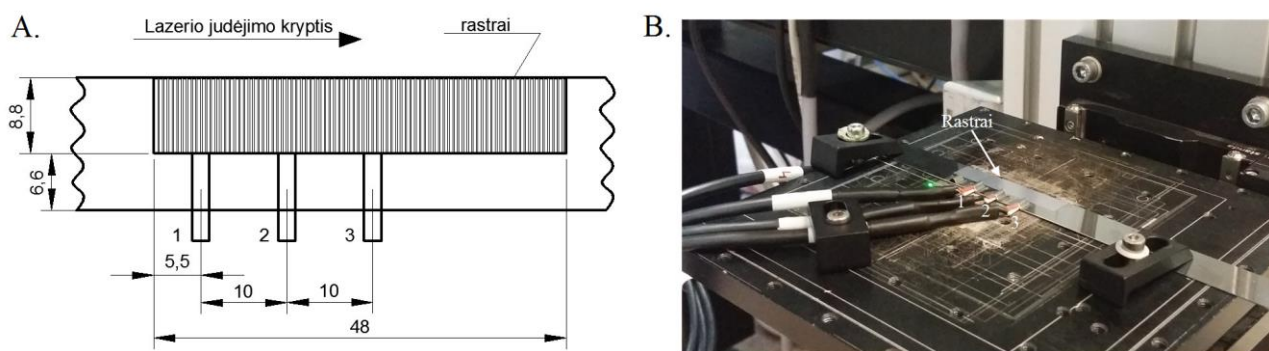
3.18 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastras, jutikliai apačioje

Nors ir bandymų kartojimai nesutampa, galime nustatyti, kad temperatūros maksimumas nukrenta $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ visose jutiklių padėtyse. Tačiau gauti duomenys yra labai netinkami, nes bangos yra išsidėsčiusios atvirkštine tvarka.

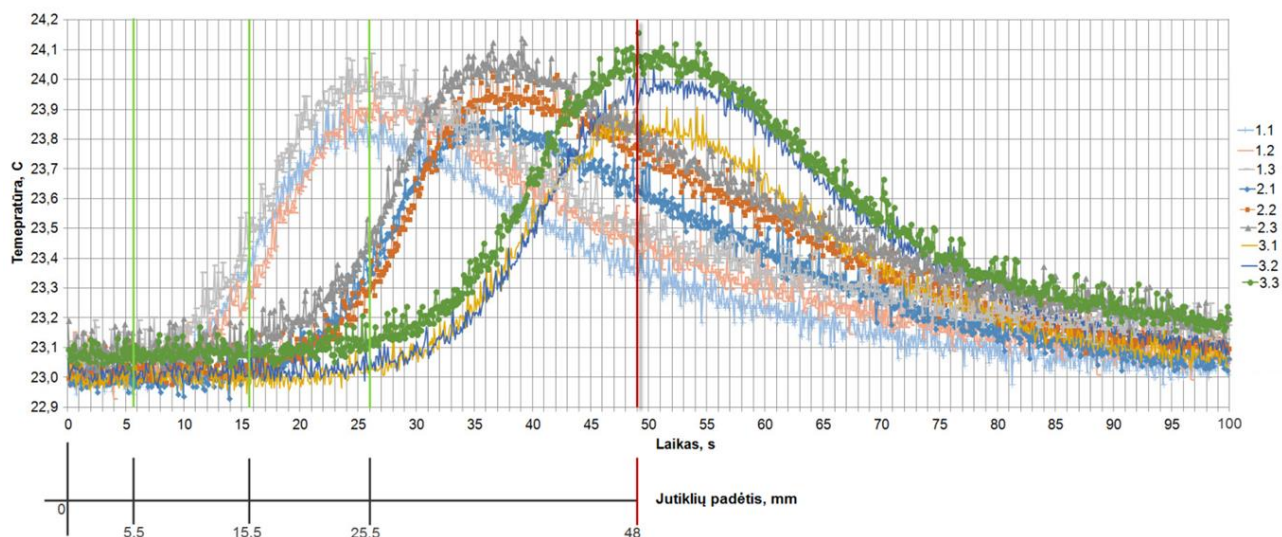
Atlikus visus bandymus padarome išvadą, kad visi atlikti bandymai netenkina užsibrėžtų kokybės bei tikslumo kriterijų, kadangi:

1. Jutiklių ribos yra nustatytos per mažos ir grafikai gaunami su „nupjautomis“ viršūnėmis.
2. Duomenų fiksavimas ir lazerio įjungimas yra nesinchroniški. Dėl to negalime nustatyti lazerio padėties temperatūros sklidimo grafike. Grafikų kartojimo bangos išsidėsčiusios chaotiškai.
3. Pirmaisiais bandymais lazeris ėjo per jutiklius, kas galėjo sąlygoti netinkamus temperatūros rezultatus.

Atsižvelgus į šias pastabas, eksperimentas pakartojamas (po kelių dienų). Antrojo eksperimento metu kondicionavimo sistema buvo išjungta ir įjungama tik tam, kad lazeris pernelyg neįkaistu ir nesumažėtų jo galia. Dėl šios priežasties pakilo norminė kambario nuo $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei poveikio temperatūros. Gumelės buvo įmontuotos jau į jutiklių laikiklius. Visi lazerio, juostelės parametrai yra tokie patys, kaip ir pirmojo eksperimento metu. Tačiau pradėjus montuoti jutiklius, vienas iš jų nulūžo, todėl viso eksperimento metu jis nieko nefiksavo. Duomenų fiksavimo pradžia yra sinchronizuota su lazerio paleidimo pradžia, todėl iš gautų duomenų bus galima nustatyti ir lazerio buvimo vietą. Jutiklių ribos yra sukalibruotos aukštesniems temperatūros rezultatams. Pirmojo bandymo metu yra formuojamas $40\text{ }\mu\text{m}$ rastras. Lazerio veikimo zona yra pastumta į viršų ir jau nebeliečia jutiklių. Jutiklių išsidėstymo schema ir veikimo zona atvaizduota 3.19 pav.

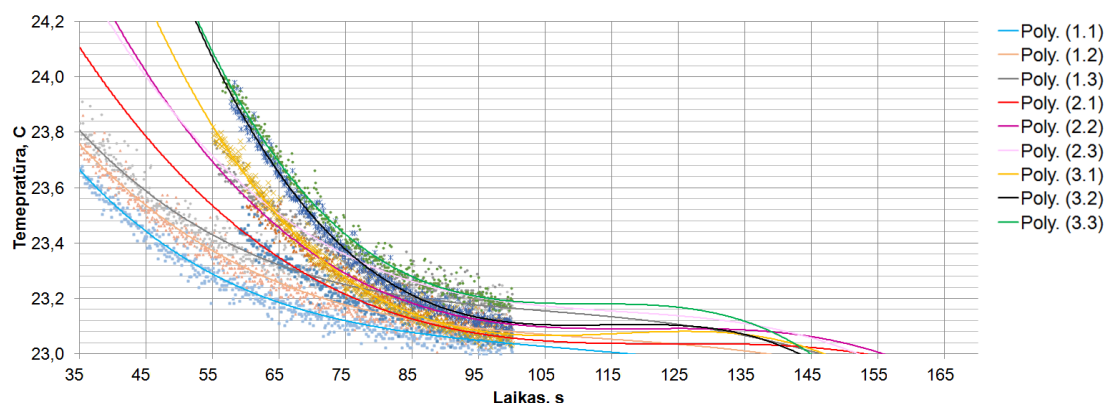


3.19 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas $40\text{ }\mu\text{m}$ rastras



3.20 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrus, jutikliai viršuje

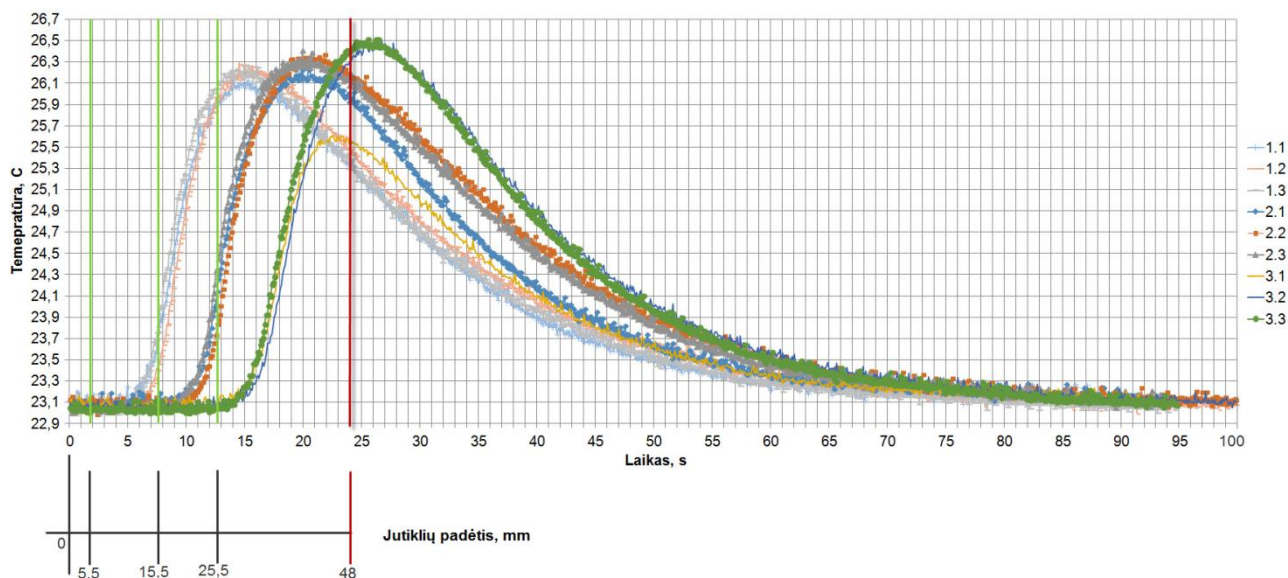
Iš 3.20 pav. matome, kad temperatūros maksimumai yra nevienodi formavimo kartojimo atžvilgiu: pirmojo formavimo trijų jutiklių temperatūros maksimumai siekia 23,9 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$; antrojo formavimo 24 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 1,1^{\circ}\text{C}$; trečiojo 24,1 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 1,1^{\circ}\text{C}$; pradinė – norminė temperatūra yra panaši 22,9 – 23 $^{\circ}\text{C}$ visiems kartojimo atvejams. Tokį temperatūros nevienodumą gali sąlygoti tai, kad lazerio spindulys gali įsiskverbti vis į gilesnius juostelės sluoksnius, šiluma labiau koncentruojasi. Paveiklo pagalba norime taip pat nustatyti, ar lazeris ir šilumos banga eina kartu, ar atskirai. Kuomet lazerio spindulys yra ties pirmu jutikliu, temperatūros maksimumas, kurį fiksuoja pirmas jutiklis, yra pasiekiamas tik po 25 s; esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas tik po 37 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos bangos maksimumas pasiekiamas tik po 52 s. Taigi šilumos banga viso apdirbimo metu yra atsiliekanti. Ilgą formavimo laiką sąlygoja didelis lazerio spindulio impulsų kartojimas, 1 mm jis siekia 3333 kartų, ilgas grįžimo kelias į pradinę padėtį, trigubas spindulio judėjimas vieno rastro formavimui ir didelis tarpelis tarp rastrų.



3.21 pav. 3.20 paveiksle pateikto bandymo temperatūros nusistovėjimas iki pradinės 22,9 – 23 $^{\circ}\text{C}$ temperatūros

Iš 3.21 pav. pastebima, kad reikia papildomo laiko, kol temperatūra vėl pasiekia pradinę. Aproximavimui panaudojamos 3 ir 4 eilės polinomiali „Excel“ aplinkoje. Pirmajai ir trečiajai jutiklių grupei, kad pasiektų pradinę – norminę temperatūrą, reikia dar plius 45 sekundžių, antrajai – apie 55 sekundžių.

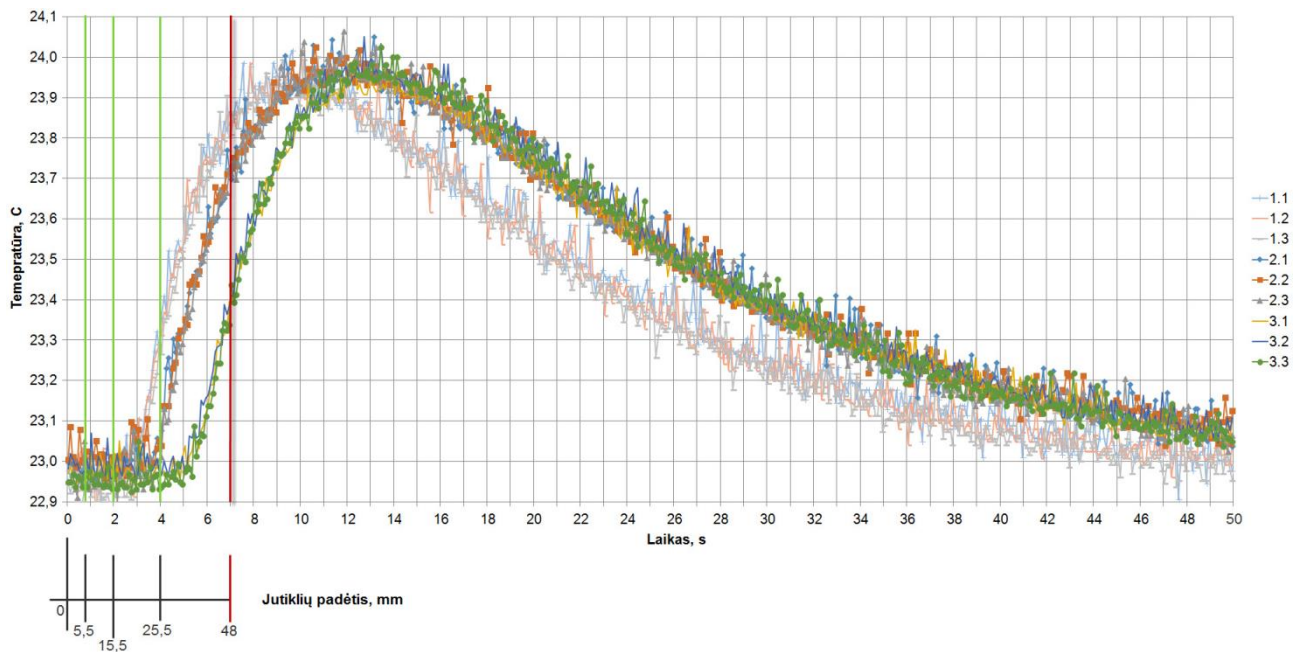
Antrojo bandymo metu viskas lieka taip pat kaip ir pirmojo atveju, tik pakeičiami lazerio parametrai – Fonas, t. y. lazeris, dabar nebeformuoja rastrų ir spindulys tiesiog nuvalo paviršių, dėl to padidėja apdribimo greitis.



3.22 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant foną, jutikliai viršuje

Pagal 3.22 pav. vėlgi matyti, kad šilumos banga yra atsiliekanči lazerio spindulio atžvilgiu. Temperatūros maksimumai yra nevienodi formavimo kartojimo atžvilgiu: pirmojo formavimo trijų jutiklių temperatūros maksimumai siekia $26,2^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3,1 - 3,2^{\circ}\text{C}$, trečiojo jutiklio rezultatai nėra vertinami; antrojo ir trečiojo formavimo metu temperatūra pakyla $0,1^{\circ}\text{C}$ kiekviename jutiklyje, atitinkamai gauname $26,3^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3,3^{\circ}\text{C}$, $26,4^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3,4^{\circ}\text{C}$, $26,5^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3,5^{\circ}\text{C}$; pradinė – norminė temperatūra yra panaši $23 - 23,1^{\circ}\text{C}$, jai pasiekti užtenka ir fiksuojamojo laiko. Kuomet lazerio spindulys yra ties pirmu jutikliu, temperatūros maksimumas, kurį fiksuoja pirmas jutiklis, yra pasiekiamas tik po 15 s; esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas tik po 20 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį, šilumos bangos maksimumas pasiekiamas po 27 s. Skirtumas tarp formavimo greičio sąlygoja greitesnį maksimumo pasiekimą, temperatūra pakyla 2°C .

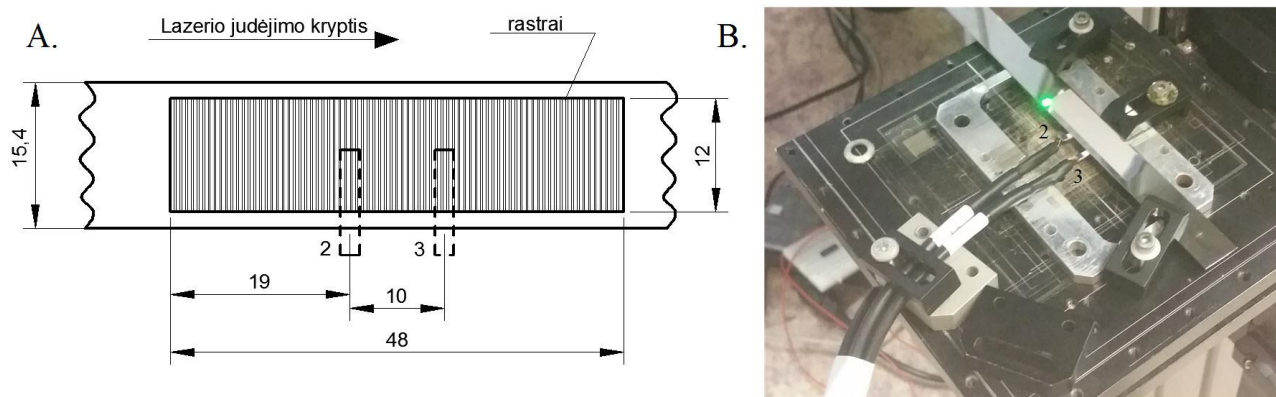
Trečio, 3.23 pav., bandymo metu formavimas pakeičiamas į $20\text{ }\mu\text{m}$. Fiksavimo laikas yra sumažinamas iki 50 sekundžių, tai yra dėl, to kad greitis padidėja ir neverta ilgai laukti.



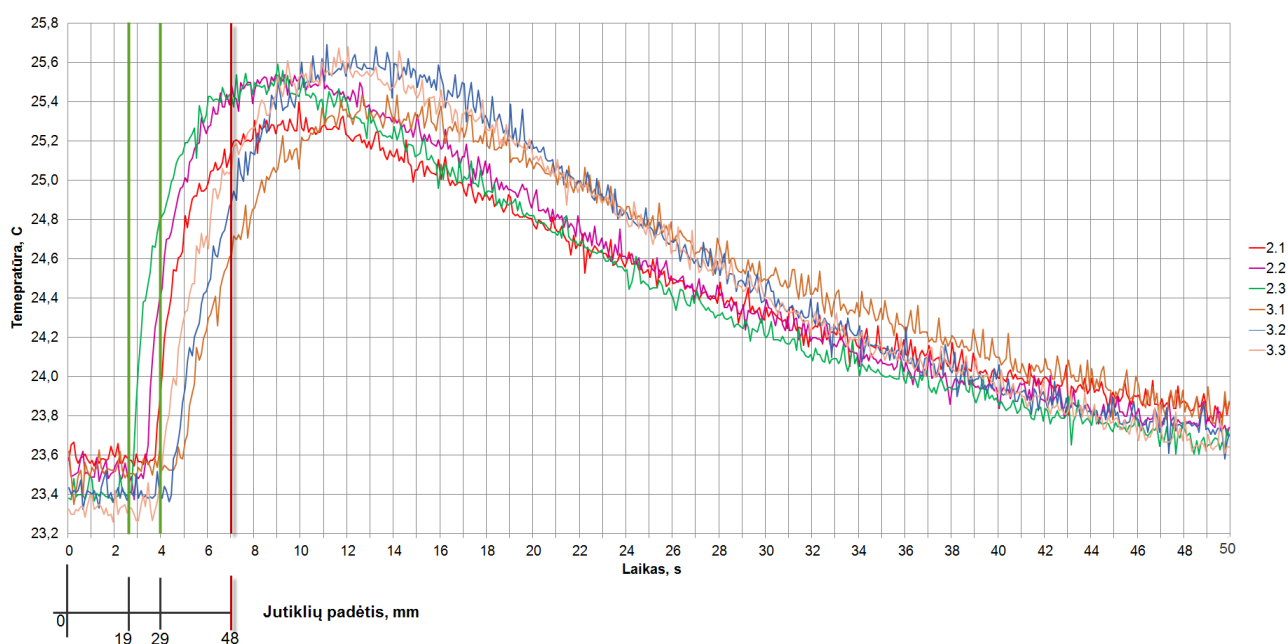
3.23 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastrus, jutikliai viršuje

Formavimo parametrų pasikeitimą sąlygoja tai, kad pasikeičia lazerio judesio trajektorija, kaip parodyta 3.2 pav. Lazerio judėjimo greitis padidėja, nes laikas vienam rastro formavimui yra apie 4,6 ms, kuomet formuojant 40 μm jis yra apie 15 ms, taip pat nėra kartojimo ir didelio tarpelio. Šio bandymo metu visi trys kartojimai yra panašūs, dėl to gauname, kad grafikai "užlipę" vienas ant kito. Temperatūros maksimumai visuose jutikliuose siekia 24 – 24,1 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 1,1 - 1,2$ $^{\circ}\text{C}$; pradinė – norminė temperatūra yra panaši 22,9 – 23 $^{\circ}\text{C}$, jai pasiekti užtenka ir fiksuojamojo laiko bei šilumos kritimas yra ne toks status, lyginant su pirmu bandymu, temperatūra krinta tolygiau. Kuomet lazerio spindulys yra ties pirmu jutikliu, temperatūros maksimumas, kurį fiksuoja pirmas jutiklis, yra pasiekiamas po 10 s; esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas po 12 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį, šilumos bangos maksimumas pasiekiamas po 13 s. Dėl didelio išilginio greičio lazerio spindulys greitai pereina per juostą ir aušimas vyksta jau jam sustojus.

Ketvirto bandymo metu formavimas lieka 20 μm . Juostelė yra apverčiama, jutikliai apačioje, ir šio bandymo metu nulūžo dar vienas jutiklis, t. y. pirmasis, taip pat pasikeičia ir atstumai tarp jutiklių ir kraštinių, juostelė nebuvo apverčiama milimetrų tikslumu. Jutiklių išsidėstymo schema ir veikimo zona atvaizduota 3.24 pav. Tvirtinant juostelę stengiamasi, kad ji kuo mažiau liestųsi su pakėlimo plokšte tam, kad būtų kuo tikslesnis matavimas.



3.24 pav. Juostos veikiant lazerio spinduliui temperatūros tyrimo stendas. A) Jutiklių išsidėstymo schema; B) Realus vaizdas. Formuojamas 20 μm rastras



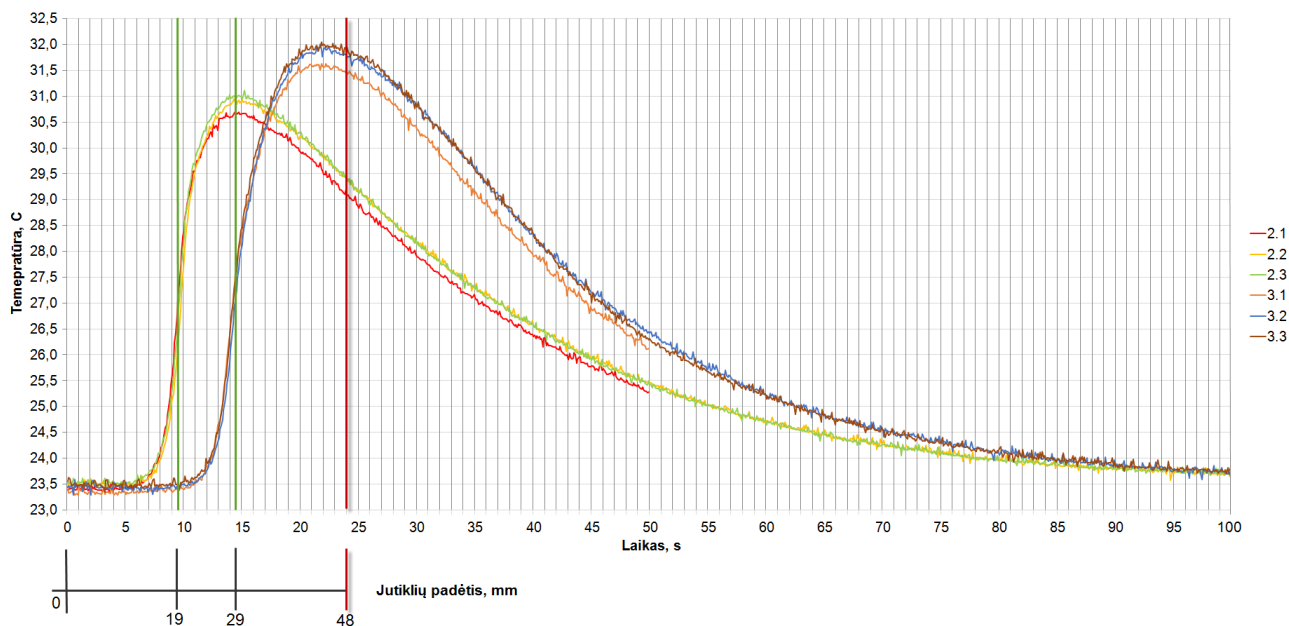
3.25 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastrus, jutikliai apačioje

Šiame ir vėlesniuose bandymuose gausime pakilusią tiek pradinę, tiek ir maksimalias temperatūras. Tai galima paaiškinti tuo, kad lazerio spindulio sugeneruotai energijai nereikia nueiti tokį didelį kelią, apie 4 mm imant nuo formavimo pločio vidurio iki jutiklių, kaip pirmuosiuose trijuose bandymuose. Šių bandymų metu kelias siekia plokštelės storį 0,5 mm.

Temperatūros maksimumai yra nevienodi formavimo kartojimo atžvilgiu: pirmojo formavimo dviejų jutiklių temperatūros maksimumai siekia 25,4 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 1,9 - 2,1$ $^{\circ}\text{C}$; antrojo ir trečiojo kartojimo metu temperatūra pakyla 0,1 $^{\circ}\text{C}$ kiekvieno jutiklio atveju: antrame jutiklyje 25,6 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 2,2$ $^{\circ}\text{C}$, trečiame 25,7 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 2,4$ $^{\circ}\text{C}$; pradinė – norminė temperatūra 23,3 – 23,4 $^{\circ}\text{C}$ visiems kartojimo atvejams. Esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas 10 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos

bangos maksimumas pasiekiamas 12 s. Palyginus su prieš tai buvusių bandymų, maksimumo pasiekimo laiko tarpai tarp jutiklių yra didesni ir aušimo laikas yra truputį didesnis, plus dar 5 sekundės pasiekti pradinę temperatūrą.

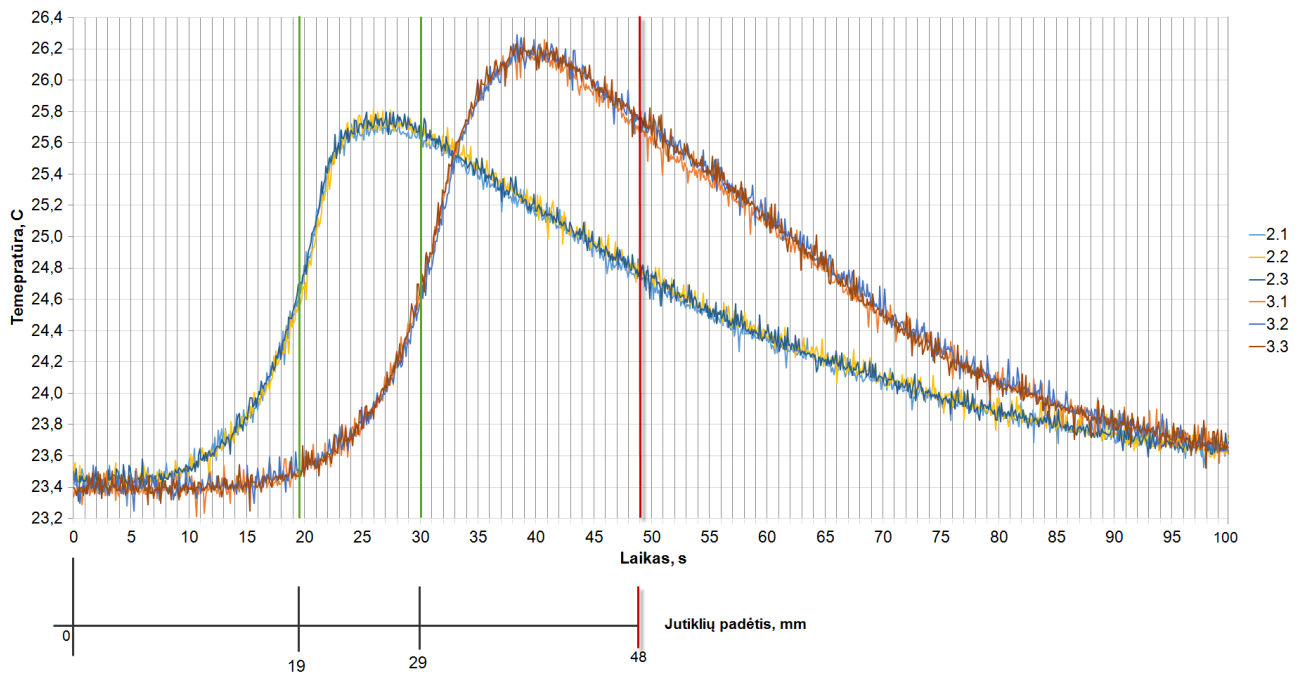
Penkto bandymo metu viskas lieka tas pats kaip ir ketvirto metu, tik pakeičiamas lazerio veikimas kaip antrojo bandymo metu, t. y. formuojamas fonas, duomenų fiksavimo laikas vėl padidinamas iki 100 s.



3.26 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant foną, jutikliai apačioje

Vėlgi temperatūros maksimumai yra nevienodi formavimo kartojimo atžvilgiu: pirmojo formavimo metu atitinkamai dviejų jutiklių temperatūros maksimumai siekia $30,7 - 31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 7,4 - 8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; antrojo ir trečiojo kartojimo metu temperatūra taip pat pakyla $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kiekvieno jutiklio atveju: antrame jutiklyje $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, trečiame $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$; pradinė – norminė temperatūra $23,3 - 23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ visiems kartojimo atvejams. Esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas po 15 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos bangos maksimumas pasiekiamas 22 s. Palyginus su antruoju bandymu pakyla maksimali temperatūra; dvigubai padidėja ΔT ; maksimumai pasiekiami dar formavimo zonoje; aušimo laikas yra didesnis: praėjusiame pradinė buvo pasiekta ties 80 s riba, o šiame – 100 s.

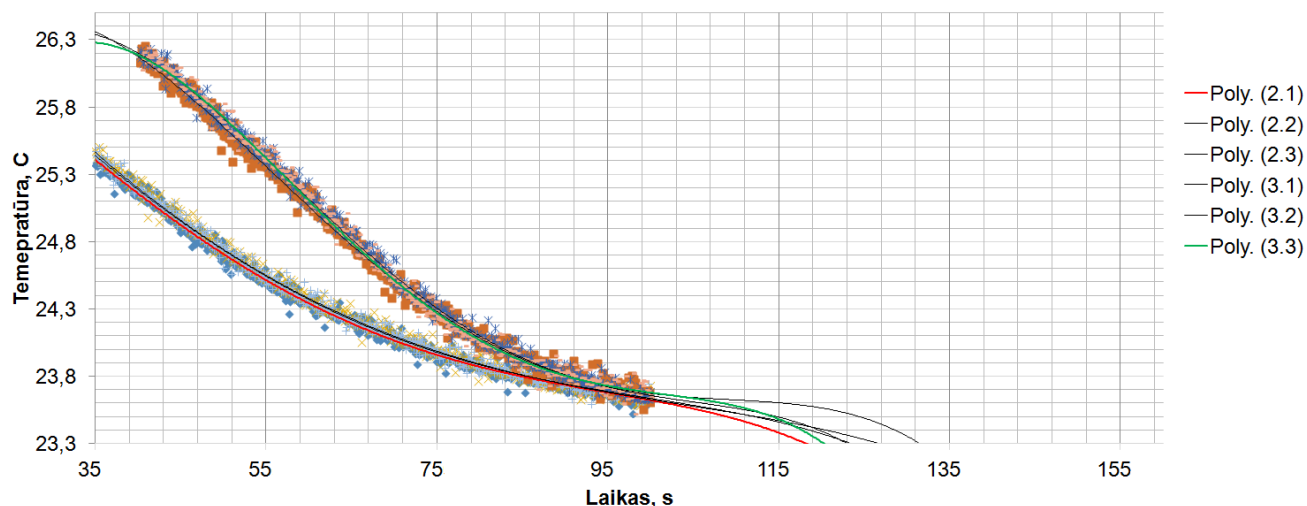
Šešto bandymo metu visi parametrai lieka tokie pat, tik formavimas yra pakeičiamas į $40\text{ }\mu\text{m}$, t. y. toks, koks buvo pirmame bandyme, todėl su juo ir lyginame.



3.27 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrus, jutikliai apačioje

Formavimo kartojimo atžvilgiu grafikai yra "susilieję" į vientisą kreivę: antrojo jutiklio temperatūros maksimumas siekia 25,8 °C, $\Delta T = 2,5$ °C; trečiojo 26,3 °C, $\Delta T = 3$ °C; pradinė–norminė temperatūra 23,2 – 23,3 °C visiems kartojimo atvejams. Esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu, temperatūros bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis, yra pasiekiamas po 26 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos bangos maksimumas pasiekiamas 40 s. Maksimumai pasiekiami dar formavimo zonoje; nėra atskirties tarp kartojimų; laiko tarpas, kai lazerio spindulys pasiekia jutiklį, ir momentas, kada pasiekiamas temperatūros maksimumas, yra apie 5 s, kuomet pirmojo bandymo metu laikas yra apie 17 s.

Taip pat ir aušinimo laikas, t. y. grįžimas iki norminės temperatūros, yra trumpesnis, tai atspindi 3.28 pav., jis siektų plus dar 20 sekundes, ir atvėsta gana tolygiai, laikas beveik vienodas abiem jutikliams.

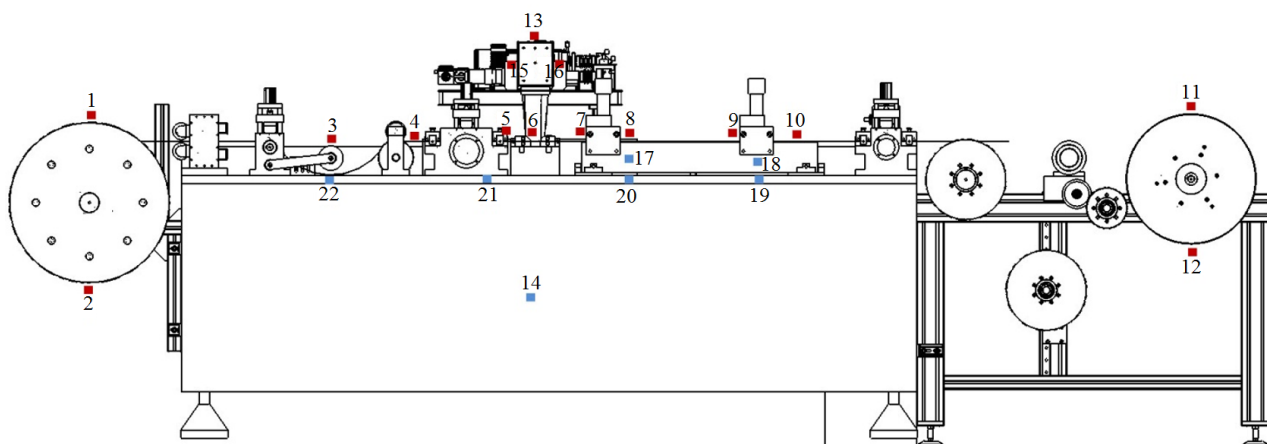


3.28 pav. 3.27 paveiksle pateikto bandymo temperatūros nusistovėjimas iki pradinės 23,3 – 23,4 °C temperatūros

Temperatūros pakilimą kartojimų atžvilgiu sąlygoja tai, kad sumažėja paviršiaus atspindys, kuris išskaido šilumą į aplinką. Lazerio spinduliui antrą – trečią kartą kartojant rastro formavimą, spindulys išsisklaido po paviršių labiau dėl atsiradusių paviršiaus raibulių, kurie skaido spindulį.

3.4. Išorinių trikdžių tyrimo eiga bei aparatūra

1. Išorinių temperatūros pasiskirstymo tyrimas yra atliekamas visame įrenginio ilgyje bei atskirai lazerio – mikroskopo zonoje.
2. Tyrimo pradžioje tam tikrose specifinėse ir termiškai aktyviose vietose, 1 cm aukštyje virš juostos, sumontuojami 22 temperatūros jutikliai, kurių padėtis nurodyta 3.29 pav. Jutikliai vėliau yra sujungiami į PP2 temperatūros matuoklį, iš kurio rezultatai keliauja į kompiuterį.



3.29 pav. Jutiklių išdėstymo schema rastrų formavimo įrenginio plote

3. Temperatūros pokyčio fiksavimas atliekamas dviem juostos formavimo ilgiams: 400 mm ir 1000 mm, formuojant 40 μ m rastrus. Prieš matavimą sistema yra paliekama nusistovėti iki pastovios temperatūros. Toliau įjungiami darbiniai kompiuteriai, lazerinė sistema, galios matavimo sistema, dėl ko darbinės temperatūros pakyla ir vėl leidžiama temperatūrai nusistovėti, visa tai yra fiksuojama.

4. Atlikus lazerinės sistemos, juostos traukimo ir jutiklių kalibravimo nustatymus yra paleidžiamas įrenginys. Pirmiausia yra atliekamas pilnas ($1 \div 22$ jutikliai) sistemos temperatūros matavimas. Formuojant 400 mm yra 5 minutes fiksuojami nusistovėję duomenys ir 5 min. vyksta formavimas, tačiau dėl trikdžių, kuriuos sukelia pavaros ir lazerinė sistema, temperatūros jutikliai nieko nefiksuoja, šių trikdžių neįmanoma išvengti, kadangi visa sistema yra vienoje patalpoje. Taip pat kadangi yra didelis jutiklių skaičius, duomenų nuskaitymo dažnis yra gana mažas. Vieną duomenų eilutę užfiksuoti užtrunka apie 1:30 min. Toliau yra palaukiama ir formuojama 1000 mm juosta. Šiuo metu formavimas užima apie 10 min. Po formavimo vėl palaukiama, kol nusistovi ir gaunami duomenys.

5. Antras eksperimentas atliekamas temperatūriškai aktyviausioje zonoje, panaudojami tik 5, 6, 7, 8 ir 17 jutikliai. Šiuo atveju kiekvienas iš ilgių yra pakartojamas du kartus. Dėl to, kad jutiklių skaičius yra sumažėjęs, duomenų nuskaitymo dažnis yra daug didesnis, apie 37 sekundes, todėl gaunami ir daug banguotesni rezultatai. Abiem eksperimentams naudojami tie patys parametrai: juostos traukimo greitis 2 mm/s; lazerio optinis galingumas 3,4 W; dažnis 9,7 MHz.

Eksperimentai bus atliekami panaudojant temperatūros monitoringo įrangą UAB „Precizika Metrology“ brūkšninių matų kalibravimo laboratorijoje, kurioje palaikomos tokios sąlygos: temperatūra $20 \pm 0,2$ °C, santykinė drėgmė – (60+/-15)%.

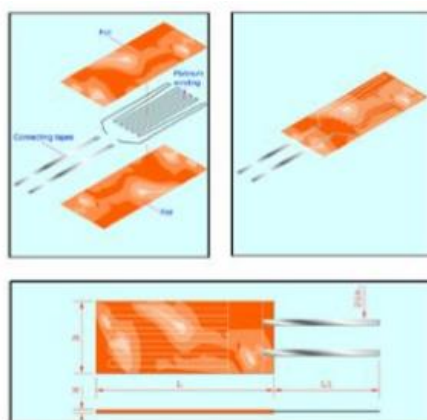
Temperatūros tyrimams buvo naudojamas temperatūros matuoklis PP2 (3.30 pav.), aukštos kokybės temperatūros jutikliai (ne žemesnės nei A klasės) (platininiai–foliniai EN60 751 ir platininiai–lustiniai PCA1.2010.1H) bei skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“, kuris buvo panaudotas jutiklių kalibravimo pataisoms.



3.30 pav. Temperatūros matuoklis PP2 (eksperimento metu užpildomos visos 22 jungtys) bei programos langas – viršuje

Temperatūros matuoklis PP2 yra labai aukšto tikslumo temperatūros bei kitų aplinkos parametrų (slėgio, drėgmės ir kitų) matuoklis. Tokius prietaisus naudoja metrologijos laboratorijos daugelyje Europos šalių: Anglijos, Vokietijos, Suomijos, Rusijos ir Šveicarijos. Į prietaisą PP2 galima prijungti iki 92 temperatūros jutiklių ir keletą analoginių įėjimų. Gali būti naudojami PT100 arba PT25 tipo jutikliai. Prietaisas yra surinktas 19 colių pagrindinėje šynoje prijungiant procesoriaus, multipleksoriaus ir analoginio kodo keitiklių plokštes. Tiksliai temperatūros reikšmei gauti naudojamas platinos (PT) jutiklis ir du atraminiai rezistoriai, kurie reikalingi prietaiso susikalibravimui. Vienas rezistorių reikalingas žemiausios temperatūros matavimo diapazone reikšmės nustatymui, kitas – aukščiausios. Temperatūros reikšmė apskaičiuojama iš priklausomybės tarp varžos ir temperatūros aproksimuotos 7 laipsnio, kuris suskaičiuojamas naudojantis platinos jutiklių žinoma varžos ir temperatūros priklausomybe išreikšta lentelėmis pagal EN 60 751 standartą. Norint prijungti keletą kitų aplinkos parametrų matuoklių, prietaisas turi 14 arba 20 bitų analoginius įtampinius (0–1 V, 0–5 V) arba srovinius (4–20 mA, 0–20 mA) įėjimus. Šiems matuokliams reikalingas atskiras maitinimas. Duomenys iš PP2 prietaiso perduodami per RS232 arba Ethernet protokolą. Galima siųsti tik reikiamo kanalo duomenų užklausimą, atsakyme yra užklausto kanalo varžos reikšmė omais. Varžos perskaičiavimas į temperatūrą yra atliekamas kompiuteryje.

Temperatūrai matuoti yra pasirenkami naudoti platininiai – lustiniai jutikliai PCA 1.2010.1H analogas PT100 (1÷13 jutikliai, charakteristikos pateiktos 3.4 lentelėje) ir platininiai – foliniai jutikliai EN 60 751 (14÷22 jutikliai) 3.31 pav.



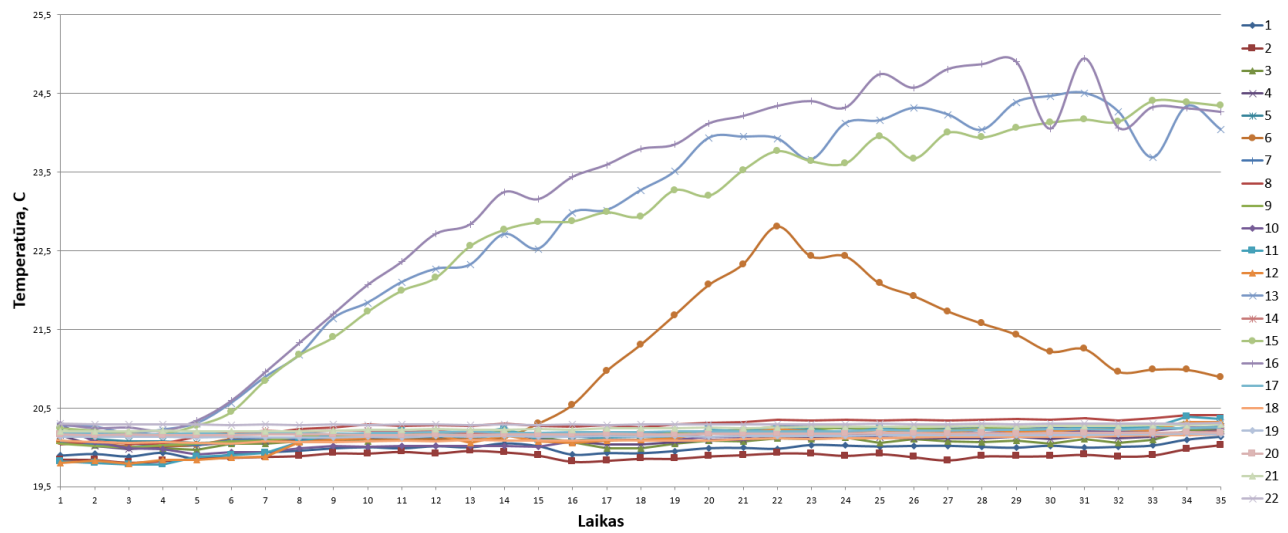
3.31 pav. Jutiklis EN 60 751 (*Platinum – foil temperature sensors to EN 60 751*)

3.5 lentelė. Jutiklio EN 60 751 charakteristikos

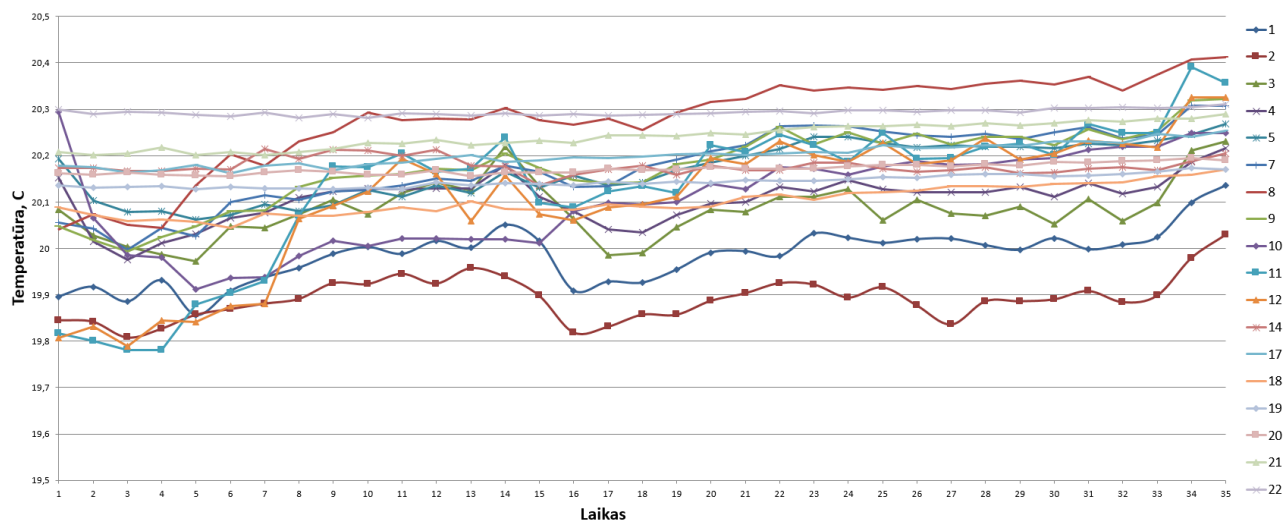
Parametrai	Reikšmės
Temperatūros diapazonas	$-80^{\circ}\text{C} \div +180^{\circ}\text{C}$
Storis	0,3 mm
Savaiminis įšilimas (ore $v=2$ m/s)	$0,05^{\circ}\text{C}/\text{mW}$
Temperatūros reakcijos per sekundę (ore $v=1$ m/s)	3
Stabilumas	$\pm 0,1\%$

3.5. Eksperimentiniai išorinių temperatūros gradiento trikdžių tyrimai

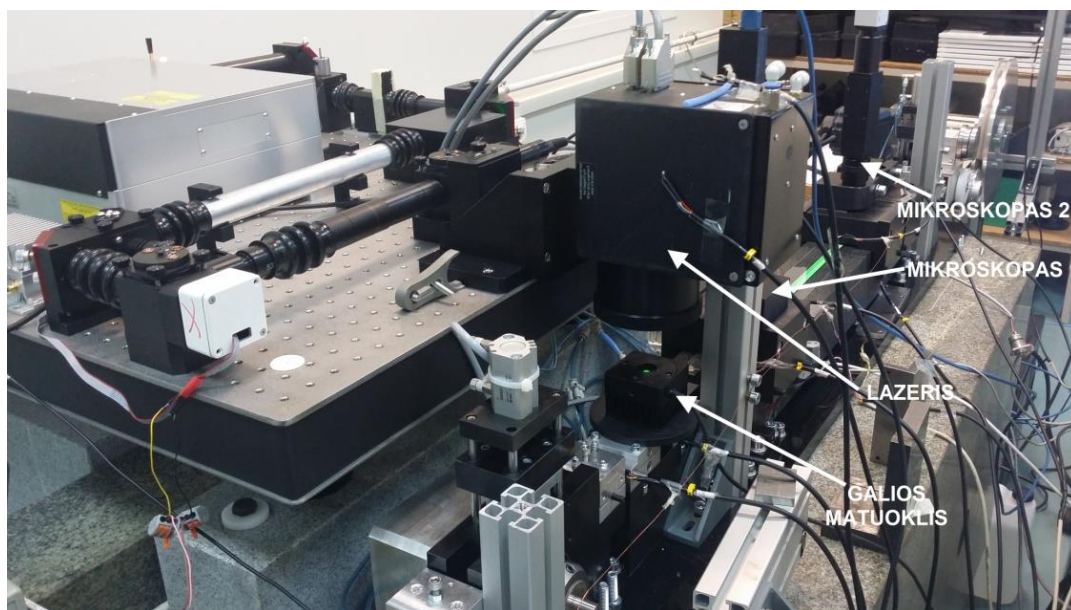
Pirmasis eksperimentas yra atliekamas nagrinėjant temperatūros pasiskirstymą visame įrenginio ilgyje, t. y. jutikliai išdėstomi kaip pavaizduota 3.29 pav. Prieš pradedant eksperimentą yra paliekama sistema nusistovėti ir vėliau įjungiami įrenginio sistemos komponentai, tai įvyksta 5 taške, 3.32 pav. Jame labiausiai išsiskiria pagrindinio šilumos šaltinio – lazerinės sistemos elementai, tai parodo 13,15,16 jutikliai, temperatūra pakyla nuo $20,2^{\circ}\text{C}$ iki $24,9^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 4,7^{\circ}\text{C}$. Taip pat yra 6 jutiklio šuolis, nes yra uždedamas lazerio galios matuoklis, kuris matuoja ir koreguoja lazerio galios parametrus. Likusių jutiklių temperatūros pokytis $\Delta T = 0,1^{\circ}\text{C}$, nuo pradinės. 3.33 pav. pateikiami rezultatai be 13,15,16 jutiklių, kadangi jie iškreipia paveikslo mastelį ir negalime detalai pažiūrėti, kas vyksta kituose taškuose. Matomas temperatūros stabilumas arba šuoliai, kurie skiriasi $0,1^{\circ}\text{C}$.



3.32 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymai prieš ir įjungiant įrenginį

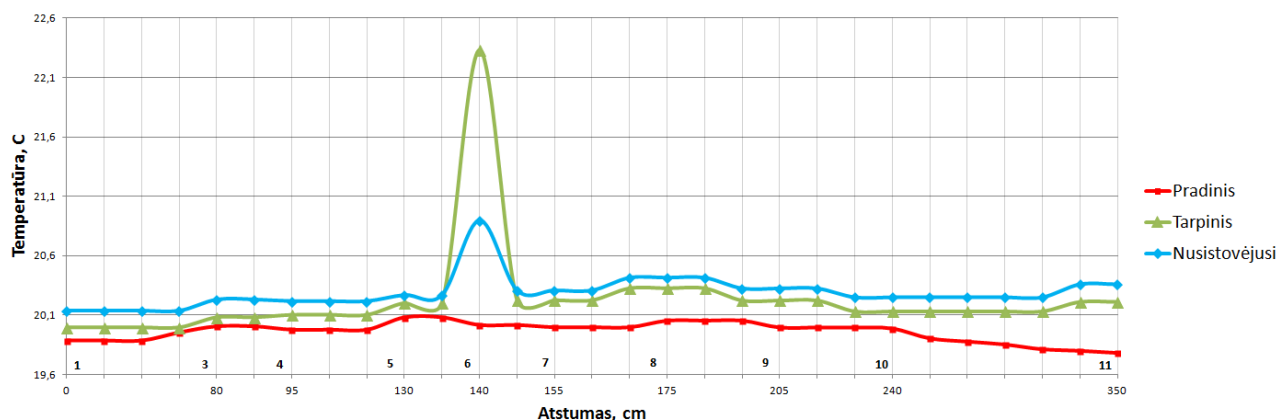


3.33 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymai prieš ir įjungiant įrenginį, be 13,15,16 jutiklių



3.34 pav. Rastrų formavimo įrenginio realus vaizdas, nurodant didžiausius šilumos šaltinius

3.35 pav. yra atskirai išskiriamas pradinis, tarpinis ir nusistovėjęs temperatūros grafikai visame įrenginio ilgyje. Įrenginio pradžioje temperatūra nuo pradinės $19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki nusistovėjęsios $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakyla $\Delta T = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pasiekus vidurį, kur yra mikroskopai (7–8 jutikliai) $\Delta T = 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai gauname dėl to, kad jie išsilya iki darbinės savo temperatūros. Šuolis ties 6 jutikliu gaunamas dėl galios matuoklio. Didžiausias temperatūrinis skirtumas visame įrenginio ilgyje pastebimas gale, kur $\Delta T = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

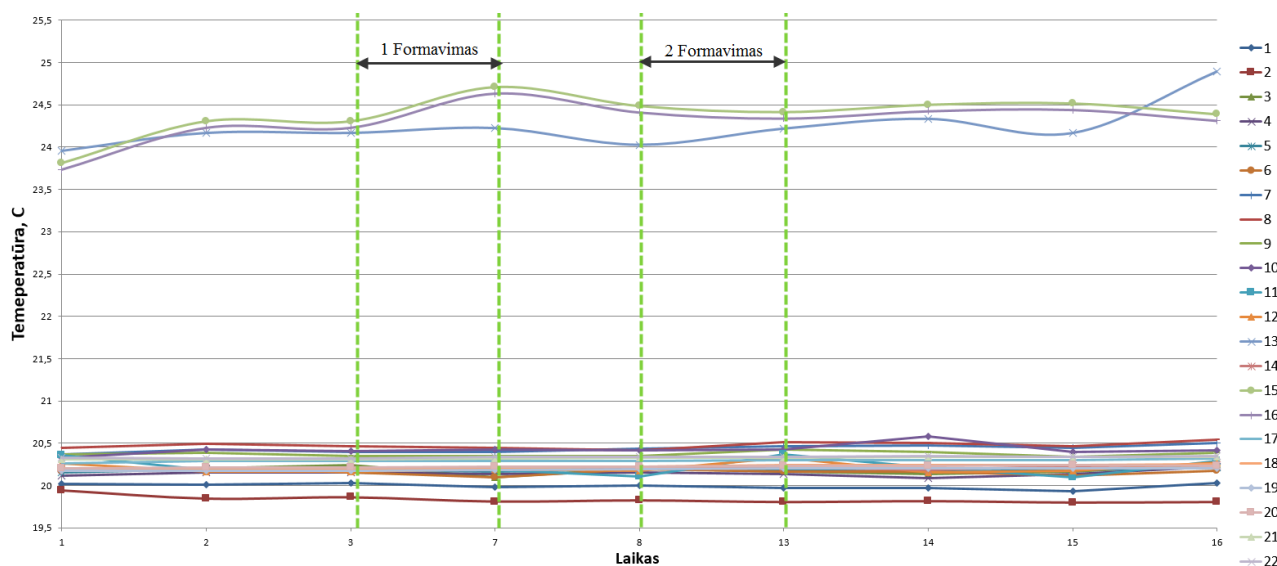


3.35 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros nusistovėjimas visame įrenginio ilgyje.

Pradinis, tarpinis ir nusistovėjęs įrenginio režimas

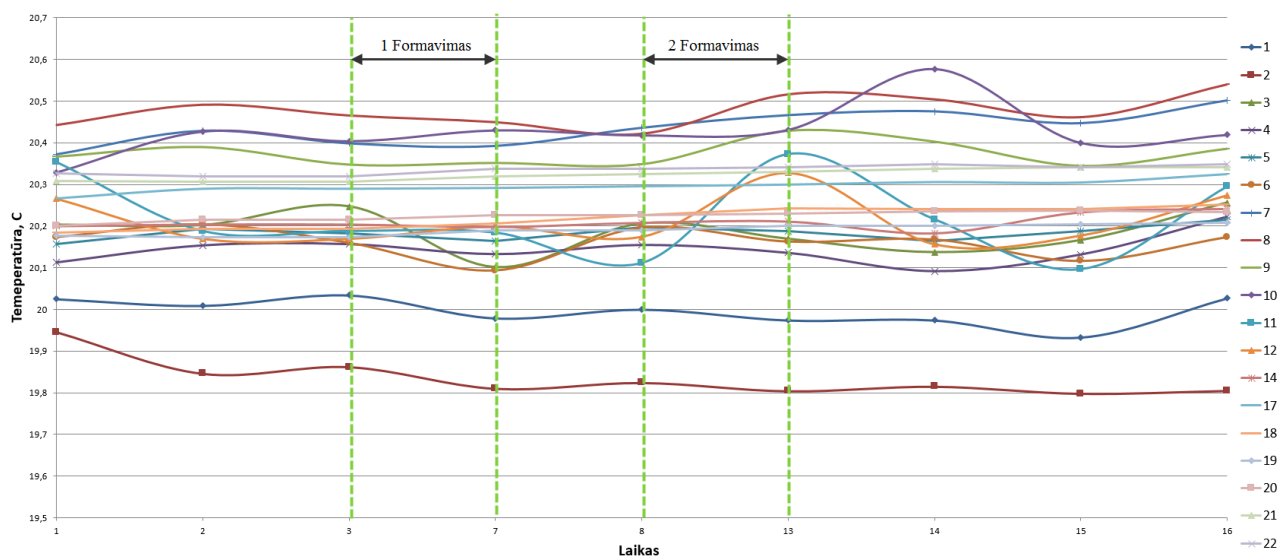
Toliau yra atliekamas rastrų formavimas ant juostos. Tarp 3 ir 7 taškų yra formuojamas 400 mm ilgio rastrinė struktūra, tai užtrunka apie 9 min., o tarp 8 ir 13 taškų yra formuojamas 1000 mm. ilgio rastrinė struktūra, tai užtrunka apie 13 min. Palyginus du formavimo ilgius matomas

didesnis lazerinės sistemos įšilimas trumpesniame formavime, $\Delta T = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vidutinė temperatūra $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, dydis labai artimas vidinių temperatūros gradiento pasiskirstymo eksperimentui.



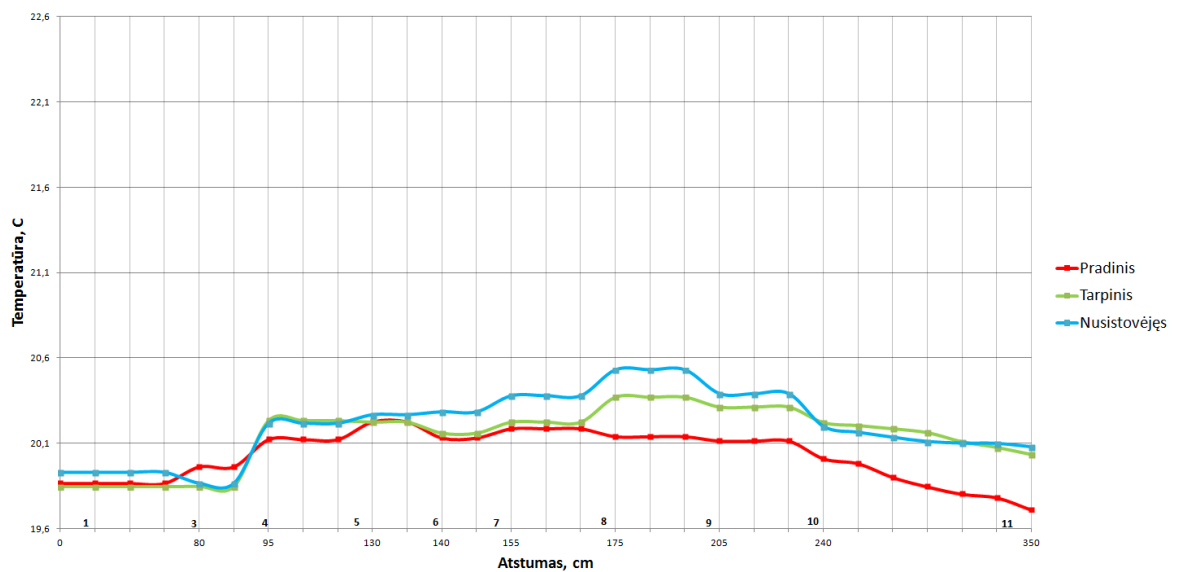
3.36 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus

Vis dėl to reikalingas atskiras paveikslas, kad galima būtų įvertinti temperatūros skirtumus kituose įrenginio taškuose. Iš 3.37 pav. matomas tiek temperatūros pastovumas, tiek ir temperatūros šuolis po formavimo priklausomai nuo ilgio. Labiausiai išsiskiria antrojo formavimo 11–12 jutikliai, kurių $\Delta T = 0,2 - 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, jie yra ties juostos susukimo ritiniu, taip pat 8–9 jutikliai $\Delta T = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ties mikroskopais, kuriems reikia daugiau energijos patikrinti juostos kokybę, lyginant su 400 mm.



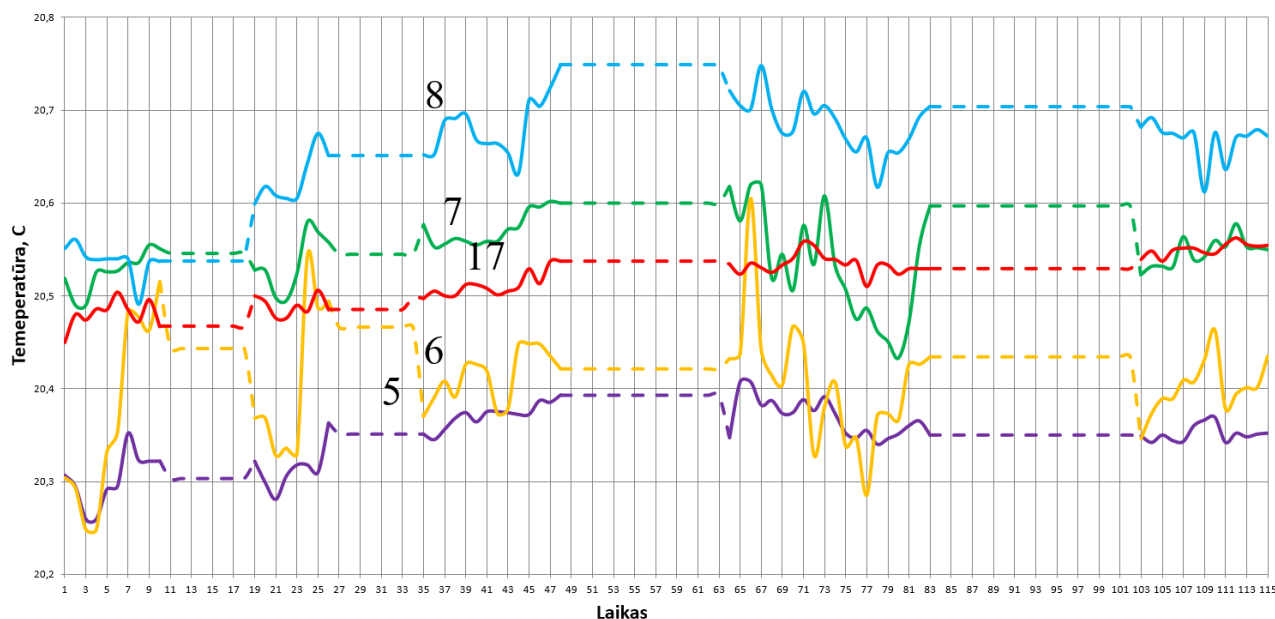
3.37 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus – atskirai be 13, 15, 16 jutiklių

Atliekant antrąjį eksperimentą yra koncentruojamas vaizdas į temperatūriškai aktyvią lazerio ir mikroskopo zoną, naudojami tik 5, 6, 7, 8 ir 17 jutikliai. Šis eksperimentas buvo atliekamas panašiai kaip ir prieš tai buvęs. Buvo paliekama nusistovėti, įjungiamą sistemą ir vėl laukiama temperatūros nusistovėjimo. Gaunamas pakartotinis nusistovėjimo grafikas (žr. 3.38 pav.) (paliekamas tame pačiame mastelyje, kaip ir prieš tai buvęs 3.35 pav.). Rezultatai labai panašūs, įrenginio pradžioje gaunamas $\Delta T = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ties viduriu apie $\Delta T = 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, tik šiuo atveju nėra galios matuoklio temperatūros šuolio, nes jis buvo padėtas ne ant plastikinio, o ant iš putplaščio pagaminto pado. Įrenginio gale $\Delta T = 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, lyginant pradinę ir nusistovėjusią kreives.



3.38 pav. Rastrų formavimo įrenginio pakartotinis temperatūros nusistovėjimas visame įrenginio ilgyje

Toliau yra atliekamas pats rastrų formavimo eksperimentas 3.39 pav. Jis užtrunka truputį ilgiau, nes buvo kartojami formavimai – du po 400 mm (apie 5 min. kiekvienas) ir du po 1000mm (apie 10 min. kiekvienas). Grafike formavimas atsispindi brūkšnine linija. Atsiradęs banguotumas yra dėl padidėjusio duomenų fiksavimo dažnio, pirmajame eksperimente visas jutiklių duomenų fiksavimo ciklas užtruko apie 3 min., o šiame – apie 37 sekundes. Jutiklių skaičius yra sumažinamas, kadangi didžiausias dėmesys skiriamas juostos apdirbimui lazerio – mikroskopo dalyje. Galime panagrinėti kiekvieną iš jutiklių atskirai.



3.39 pav. Temperatūros pasiskirstymas formuojant rastrus naudojami tik 5, 6, 7, 8 ir 17 jutikliai

Mažiausia temperatūra ir mažiausias pokytis yra 5 jutiklio, jis gana toli ir jį dar apipučia oras. Prieš formavimą ir po jo temperatūra yra gana pastovi $\Delta T = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, tik pastebimas temperatūros kilimas yra dėl kartojimo.

6 ir 7 jutikliai yra atitinkamai prieš ir po lazerinio formavimo. Po pirmo 400 mm formavimo temperatūros skirtumas $\Delta T = 0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$, po nusistovėjimo $\Delta T = 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po antrojo formavimo $\Delta T = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nusistovėjimo laikas yra didesnis, bet skirtumas lieka toks pats, $\Delta T = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Formuojant 1000 mm, tendencija lieka tokia pat, prieš ir po, $\Delta T = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatūros kritimai po formavimo atsiranda dėl stipraus oro srautų, ateinančių iš aerostatinių guolių, ypač 6 jutiklyje, nes jis būtent ir yra tarpe tarp jų. Veikimo metu oro srovė yra didesnė. Kai juosta nėra traukiama, temperatūros po truputį pakyla iki savo norminių verčių. Matoma, kad kuo ilgesnis formavimas, tuo žymesnis temperatūros kritimas po formavimo.

Tačiau stebint 8 jutiklio rezultatus, ypač po dviejų 400 mm formavimo, temperatūra nuo pradinės $20,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakyla iki $20,71\text{ }^{\circ}\text{C}$ prieš 1000 mm formavimą. Ir po to, nors jam reikia stebėti didesnį rastrų skaičių, temperatūra, atvirkščiai, žemėja.

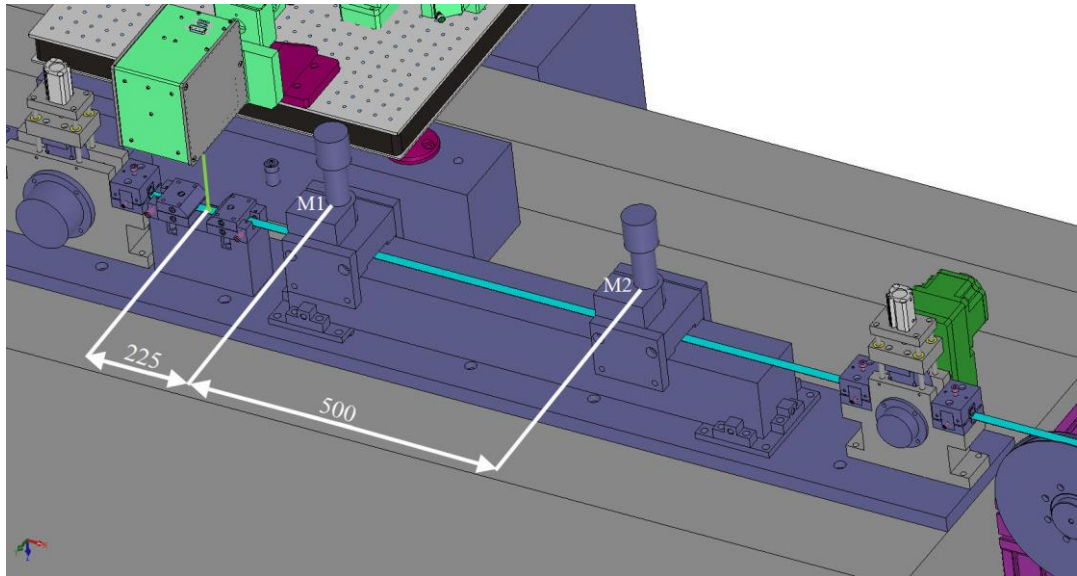
17 jutiklis, esantis ant granito šalia mikroskopo, taip pat pasižymi temperatūrišku pastovumu, kreivė labai panaši į 5 jutiklio. Bendroje tendencijoje matoma, kad formavimo ilgis turi įtakos temperatūroms, kadangi kreivė būtent periodiškai kyla.

4. TEMPERATŪROS PAKLAIDŲ TYRIMAS, KOMPENSACIJA

4.1. Temperatūros paklaidų tyrimo metodika

Metrologinių skalių gamyboje neišvengiamai susiduriama su neigiamomis rastrų formavimo įrenginio veikimo pasekmėmis, kurios turi įtakos galutiniam rastrų tarpusavio padėties tikslumui. Susiduriama su vibracijomis, vidinių ir išorinių oro srautų nevienodu pasiskirstymu, bet labiausiai su netinkamu temperatūros gradiento pasiskirstymu, kuris sukelia paklaidas, kurias būtina reikia įvertinti ir kompensuoti kalibruojant. Temperatūros paklaidos yra vienas iš didžiausių neapibrėžties komponentų, kadangi tos pačios rūšies metalas gali turėti skirtingo kiekio ir pobūdžio priedus, dėl kurių gaunami skirtingi temperatūros plėtimosi koeficientai bei esant skirtingam bent vieno laipsnio skirtumui, susiformuoja ilgio paklaidos, kurios gali skirtis kelis kartus, pavyzdžiui $\Delta 1K$ tai $\Delta L = 16,5 \mu m$, o kai $\Delta 2K$ tai $\Delta L = 33 \mu m$ (*The Coefficient of Expansion Determines the Accuracy*). Matmenų pokytis tiesiogiai priklauso nuo temperatūros pokyčio, linijinio plėtimosi koeficiento ir matmenų. Skalės matmenys laikomi tikrais, kai jos temperatūra lygi norminei, $T_1 = 20^\circ C$. Tačiau kalibruojamos skalės temperatūra dėl lazerinio apdirbimo, aerostatinių guolių ir kitų komponentų poveikio nėra lygi norminei, nėra pastovi visame įrenginio ilgyje bei kalibruojant kinta (Vekteris 2000). Tokiu būdu susiformuoja kintančios laike ir skalės ilgyje paklaidos.

Pagal bendrą algoritmą temperatūros paklaidų kompensacija realizuojama tokia veiksmų seka: nustatomi ir įvertinami šilumos šaltiniai; skaičiuojami jų sukelti temperatūros laukai; pagal temperatūros laukus skaičiuojamos temperatūros deformacijos ir temperatūros paklaidos; nustatoma ir kompensuojama temperatūros paklaidų sistemingoji dedamoji. Sukonstruotame lazeriniame rastrų formavimo įrenginyje numatytas tam tikru atstumu l , kuris yra kartotinis formuojamų rastrų žingsniui, esančių rastrinių elementų atstumo kitimo monitoringas. Šiam rastrų tarpusavio padėties kitimo, t. y. skirtingų tarpų tarp rastrų, atsirandančio dėl lazerio spindulio temperatūros poveikio ir kitų priežasčių nustatymui yra naudojami du mikroskopai su CCD kameromis, įtvirtinti tarpusavyje tiksliai bei pastoviai 500 mm atstumu. Atstumas tarp rastrų formavimo zonos vidurio, t. y. lazerio spindulio veikimo zonos ir pirmojo mikroskopo centro, yra 225 mm. Tai schematiškai pavaizduota 4.1 pav.:



4.1 pav. Lazerio spindulio ir CCD mikroskopų padėties atstumai

Tokiai sistemai temperatūros paklaidų kompensacija atliekama šia tvarka:

1. Nustatoma juostos temperatūros vidutinės reikšmės juostos pjūvyje kitimas tarp pirmojo M1 mikroskopo iki antrojo M2 mikroskopo centrų. Suformuojamas grafikas, kuriame duomenys lazerio kreivei yra imami apjungus „COMSOL“ modeliavimo ir vidinių temperatūros gradiento eksperimento duomenis. Aplinkos kreivė gaunama apjungus visus išorinių temperatūros gradiento eksperimento rezultatus.

2. Pagal formulę, (4.1), apskaičiuojamos temperatūros deformacijos reikšmė, $L=500$ mm juostos ilgyje t. y. tarp pirmojo M1 ir antrojo M2 mikroskopų.

$$\Delta L_T = \alpha \cdot \int_0^{0,5} \Delta T(x) dx, \quad (4.1)$$

čia $\Delta T(x)$ juostos vidutinio temperatūros nuokrypio nuo norminės 20°C tarp mikroskopų M1 ir M2, funkcija; α yra linijinio plėtimosi koeficientas, kuris lygus $15,1 \cdot 10^{-6}$ K;

Lazerio įtaka temperatūros deformacijoms apskaičiuojama pagal eksponentinę formulę:

$$\Delta T(x) = f(x) = (0,5^x) * 0,8 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}}, \quad (4.2)$$

čia $x \in [0,3; 3]$ periodas 0,3.

Aplinkos įtaka temperatūros deformacijoms apskaičiuojama pagal eksponentinę formulę:

$$\Delta T(y) = f(x) = (0,45^x) * 0,9 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}}, \quad (4.3)$$

čia $x \in [0,1; 0,28; 0,46; 0,64; 0,7; 0,76; 0,81; 0,83; 0,86; 0,89]$

3. Realio rastrų formavimo metu laiko momentais, kai rastriniai elementai, esantys M2 mikroskopo stebėjimo laike yra šio lauko matymo zonos centre (rastrinio elemento pasirinktas

kraštas sutampa su mikroskopo optine ašimi), ir mikroskopu M1 registruojami tikrieji atstumai $\Delta L_{pad.}$ tarp brūkšnių, nominalusis (vardinis) atstumas tarp kurių lygus $L=500$ mm.

4. Dydžio $\Delta L_{pad.}$ skaičiavimo periodas priimamas lygus 1 s. Tai atitinka 2 mm formuojamos skalės ilgiui. Toks periodiškumas pakankamas išryškinti vidutinio ir žemo dažnio paklaidoms, kurias prasminga kompensuoti. Eksperimento rezultate gaunamas grafikas, parodantis paklaidų pasiskirstymą formavimo metu.

5. Rastrinių elementų padėties, $\Delta L_{pad.}$, paklaida nustatoma skalės ilgio funkcijos $\Delta L_{pad.}$ reikšmėmis.

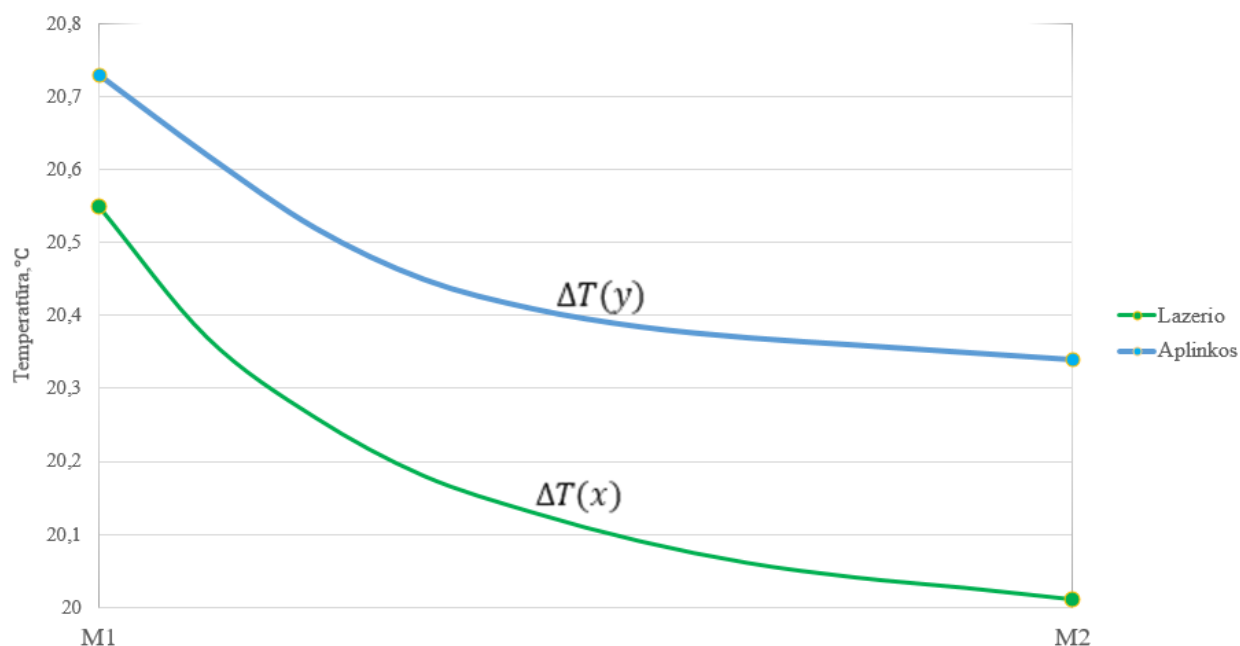
6. Temperatūros paklaidų kompensacija diskrečiuose taškuose atliekama iš $\Delta L_{pad.}$ reikšmės atimant temperatūros deformacijos ΔL_T reikšmes. Gaunamas ištaisytasis matavimo rezultatas lygus:

$$\Delta L_{ištai.} = \Delta L_{pad.} - \Delta L_T \quad (4.4)$$

7. Jei neatliekamas skalės temperatūros gradiento jos ilgyje L tarp pirmojo M1 ir antrojo M2 mikroskopų, skalės paklaidos $\Delta L_{ištai.}$ reikšmių atskiruose taškuose skaičiavimui priimama $\Delta L_T = const.$

4.2. Temperatūros paklaidų kompensacija

Pasinaudojus visais gautais rezultatais yra nustatomas vidutinės temperatūros gradiento grafikas, juostos skerspjūvyje tarp pirmojo M1 ir antrojo M2 mikroskopų esant lazerio ir aplinkos įtakai, kuris parodytas 4.2 pav.:



4.2 pav. Juostos skerspjūvio vidutinio temperatūros gradiento pasiskirstymas tarp M1 ir M2 esant lazerio ir aplinkos įtakai

Nors skalė formuojama termiškai nusistovėjus sistemai termokonstancinėje laboratorijoje, kurioje palaikoma pastovi aplinkos temperatūra, temperatūros deformacijos ΔL_T juostos ilgyje $L=500$ mm tarp pirmojo M1 ir antrojo M2 mikroskopų priimamos pastovios. Pasinaudojus (4.1 ir 4.2) funkcija suskaičiuota temperatūros deformacijos vidutinės paklaidos skaitinė reikšmė esant

lazerio poveikiui:
$$\Delta T(x) = 15,1 \cdot \int_0^{0,5} \left((0,5^x) * 0,8 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) dx = 15,1 \cdot \left(\left(-\frac{4}{5 \cdot 2^x \ln(2)} + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) \frac{0,5}{0} - \left(-\frac{4}{5 \cdot 2^x \ln(2)} + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) \frac{0,5}{0} \right) = 15,1 \cdot 0,339 = 5,118 \mu m.$$

Tačiau šis dydis nėra baigtinis, kaip dar vieną dydį priimame aplinkos įtaką temperatūros deformacijos reikšmei, šis dydis apskaičiuojamas papildomai panaudojus 4.3 formulę:

$$\Delta T(y) = 15,1 \cdot \int_0^{0,5} \left((0,45^x) * 0,9 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) dx = 15,1 \cdot 0,371 = 5,602 \mu m$$

Gaunama temperatūros deformacijos vidutinės paklaidos reikšmė: $\Delta L_T = \Delta T(x) + \Delta T(y) = 5,118 + 5,602 = 10,72 \mu m$. Šį dydį pagal (4.4) formulę atimant iš ΔL_{pad} matavimo rezultatų gaunamas ištaisytais matavimo rezultatas.

IŠVADOS

Įvykdyti numatyti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, gauti lazerinės rastrų formavimo metalo paviršiuje technologijos sukūrimui vertingi terminių procesų ir paklaidų tyrimo rezultatai. Modeliavimo būdu nustatytas liniuotės vidutinės temperatūros pokytis kelioms charakteringoms būsenoms. Nors temperatūra lazerio spindulio zonoje yra labai aukšta, siekia iki 450 °C, tačiau per trumpą laiką dėl šiluminio laidumo pasklinda skalės tūryje ir vidutinė skalės temperatūra pakyla nežymiai. Esant visiškai terminei izoliacijai, veikiant rastrus formuojančio lazerio spinduliui, nusistovi 8,8 °C vidutinė liniuotės temperatūra. Esant natūraliai konvekcijai, įkaitusi liniuotė yra aušinama aplink ją esančio oru, temperatūra eksponentiškai gęsta tolstant lazerio pluoštui ir liniuotė atšąla iki 1 °C, viršijančio aplinkos temperatūrą 150 mm intervale. Liniuotę priverstinai aušinant pučiamu oru, liniuotė atšąla iki aplinkos temperatūros 10 cm ilgio ruože.

Lazerinio rastrų formavimo sistemos įtaka buvo tiriama dvejopai. Pirmiausia eksperimentiškai nustatomas temperatūros gradiento pasiskirstymas jutikliais, kurie glaudžiai primontuoti ant juostos. Tokiu būdu nustatoma aplinkos, iš dalies vidinės juostelės temperatūros, kurių dydis kinta priklausomai nuo rastrų formavimo dydžio bei jutiklių padėties juostelės atžvilgiu. Esant jutiklių padėčiai viršuje, 20 μm bei 40 μm rastrų formavimui temperatūros skirtumas nuo pradinės iki fiksavimo maksimumo yra palyginti vienodas, siekia apie 1,1 °C, tačiau temperatūra pakyla daugiau nei dvigubai, esant jutiklių padėčiai apačioje, 20 μm atžvilgiu $\Delta T = 2,2$ °C, o 40 μm $\Delta T = 3$ °C. Toks palyginti nedidelis temperatūros pokytis nuo pradinės turi labai didelę įtaką susiformuojančioms paklaidoms ir ypač jų kompensavimui. Tokiu būdu pamatomas ir skirtingas temperatūros pasiskirstymas į plotį ir į gylį, nes galiausiai gauname, kad į gylį temperatūra prasiskverbia gana greitai ir aušimo laikas taip pat yra didesnis. Eksperimentiniai tyrimai, kuriais buvo imituojamos realios skalės rastrų formavimo sąlygos, patvirtino „COMSOL“ programos modeliavimo rezultatus apie skalės temperatūros pokyčius. Formuojant 20 μm žingsnio rastrą, kuomet lazerio spindulys veikia su periodiškai besikartojančiomis pertraukomis, temperatūros pokytis ΔT rastrų formavimo paviršiuje svyruoja nuo 0,95 °C iki 1,05 °C. Šiluminės bangos sklaidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje mažesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greitį išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 10 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 50 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Temperatūros priešingoje ruošinio pusėje, t. y. apvertus jį, ΔT svyruoja nuo 1,7 °C iki 2,3 °C. Šiluminės bangos sklaidimo greitis nežymiai mažesnis negu lazerio spindulių pluošto slinkimo greitis išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 7

s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 55 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

Formuojant 40 μm žingsnio rastrus viršutiniame paviršiuje temperatūros pokytis ΔT svyruoja nuo 0,7 $^{\circ}\text{C}$ iki 1,05 $^{\circ}\text{C}$. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje artimas lazerio spindulių pluošto slinkimo greičiui išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 20 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 120 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Priešingoje juostos pusėje ΔT svyruoja nuo 2,3 $^{\circ}\text{C}$ iki 2,9 $^{\circ}\text{C}$. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje didesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greičiui išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 7 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 100 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

Formuojant foną, t. y. kuomet lazerio spindulys veikia nepertraukiamai viršutiniame paviršiuje ΔT svyruoja nuo 3,2 $^{\circ}\text{C}$ iki 3,4 $^{\circ}\text{C}$. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje mažesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greitį išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 13 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 100 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį, t. y. jai pasiekti užtenka fiksuojamojo laiko. Skirtumas tarp formavimo greičio sąlygoja greitesnį maksimumo pasiekimą, temperatūra pakyla 2 $^{\circ}\text{C}$. Priešingoje juostos pusėje ΔT svyruoja nuo 7,3 $^{\circ}\text{C}$ iki 8,2 $^{\circ}\text{C}$. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje didesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greičiui išilgai ruošinio. Jutikliai maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 6 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 100 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

Rastrų formavimo kokybei, t. y. vienodiems jų tarpusavio išsidėstymo atstumams, turi įtakos ir viso įrenginio elementų, atskirų jo dedamųjų, temperatūros pasiskirstymas juostos aplinkoje. Darbinėmis sąlygomis atskirų elementų temperatūra yra skirtinga ir maksimaliausias skirtumas siekia $\Delta T = 0,4$ $^{\circ}\text{C}$. Žinoma, didžiausias šuolis vėlgi yra ties lazeriu apie 24,5 $^{\circ}\text{C}$, kuomet norminė yra 20 $^{\circ}\text{C}$. Sąlyginai temperatūros koncentruojasi ties 20,1–20,3 $^{\circ}\text{C}$, tačiau iš visos matavimo sistemos išsiskiria dar du CCD matricos mikroskopai, kurie priklausomai nuo formavimo ilgio įšyla skirtingai. Formuojant 1000 mm juostą, jie įšyla labiau, kadangi turi panaudoti daugiau energijos rastrinių struktūrų tarpusavio padėties patikrinimui, temperatūra siekia 20,55–20,75 $^{\circ}\text{C}$.

Visas šiuos nedidelius temperatūros nuokrypius būtų galima stabilizuoti atitinkamomis ventiliavimo sistemomis, mikroskopus papildomai aušinant, lazerinės sistemos modulį perkeltant į kitą patalpą. Taipogi vidinių ir išorinių temperatūros gradientų tyrimais nustatyta, kad po tam tikro laiko nuo sistemos įjungimo nusistovi terminė aplinka, kai procesą techniniams tikslams pakankamu tikslumu galima laikyti stabiliu.

Pats rastrų formavimo įrenginys turi tarpusavyje susijusią sistemą, t. y. CCD matricos mikroskopai nagrinėja rastrų tarpusavio padėtį. Padėties kompensacija šiame įrenginyje yra kompleksinė, tačiau darbe yra nagrinėjama tik viena jos dedamoji, ties kuria ir koncentruojasi darbas, temperatūros paklaidos, susiformuojančios dėl lazerio ir aplinkos. Teigiant, kad temperatūros ir tarpusavio padėtis yra pastovios dedamosios, panaudojus vidutinio temperatūros gradiento nusistovėjimo funkciją tarp dviejų CCD matricos mikroskopų, gaunama pastovioji 10,72 μm paklaida.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Bimetallic Strip Calculator* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.calqlata.com/productpages/00045-help.html>>.
- Biomedicininiai lazeriai* [interaktyvus]. 2007. Klaipėdos universitetas [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://techno.su.lt/~lauruska/knyga1/h1.pdf>>.
- Čižiūnas A. 2008. *Aplinkos įtakos brūkšninio ilgio kalibratoriaus temperatūros gradientui tyrimai*. Vilnius.
- Dahotre N.; Samant A. 2012. *Laser Machining of advanced materials*. Londonas, Niujorkas.
- Ehrmann J.S.; Cordingley J.J.; Smart D.V. Gsi Lumonics Corporation. JAV patentas. *High – speed, precision, laser – based method and system for processing material of one or more targets within a field*. US 6777645 B2. 2004 08 17.
- Ellin A.D.S.; Henshaw J.R.; Renishaw Plc. JAV patentas. *Laser marking*. US 8466943 B2. 2013 06 13.
- Femtosecond laser micromachining: a back-to-basics primer* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2015 08]. Prieiga per internetą: <<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-27/issue-04/features/femtosecond-laser-micromachining-a-back-to-basics-primer.html>>.
- FIZ 121 molekulinė fizika ir termodinamika. Laboratorinis darbas. Šiluminio plėtimosi koeficiento nustatymas* [interaktyvus]. 2004. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <http://gamta.vdu.lt/bakalaurai/lab_darbai/apl_fiz/ESF%20MF%20LD%207%20pletimosi.pdf>.
- Fizinių ir technologinių mokslų centro (FMTC) laboratorijos atlikta modeliavimo ataskaita. 2015. Vilnius.
- Gimbutis G. 1993. *Šiluminė technika*. Vilnius.
- Heat Radiation. Stefan-Boltzmann Law* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/stefan.html>>.
- How an encoder works* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<https://www.youtube.com/watch?v=Q9d3d-gNii8>>.
- Huebner H.K.; Dewhirst L.D.; Smith E.D. 2001. *The finite element method for engineers, 4th edition*. Niujorkas, Torontas.
- Jonušas R.; Kalpokas J.; Lazarauskas P. 2004. *Koncentruotos energijos metodų taikymas apdirbant medžiagas*. Kaunas.
- Kakac S.; Yener Y. 2014. *Convective heat transfer*. Londonas, Niujorkas.

- Knizhnik K. *Derivation of the stefan-boltzmann law* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 05]. Prieiga per internetą: <http://www.pha.jhu.edu/~kknizhni/StatMech/Derivation_of_Stefan_Boltzman_n_Law.pdf>.
- Lappalainen R.; Siren S.; Salmi T. Partek Cargotec Oy. JAV patentas. *Laser marking method and a metal surface marked by this method*. US 5632916 A. 1997 05 27.
- Lauruška V.; Ščiukaitė J. 2006. *Fizikos laboratoriniai darbai*. Šiauliai.
- Lewis R.W.; Nithiarasu P. 2004. *Funadamentas of the Finite element method for heat and fluid flow*. Londonas.
- Mackowski W.D. 2015. *Conduction heat transfer notes for MECH 7210*. Alabama.
- Nikishkov G. 2010. *Programming Finite Elements in Java*. Londonas.
- NTC Thermistors [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 08]. Prieiga per internetą: <<http://www.murata.com/en-global/products/thermistor/ntc>>.
- Pelsue K. Gsi Group Corporation. JAV patentas. *Optical metrological scale and laser-based manufacturing method therefor*. US 7903336 B2. 2011 03 08.
- Platinum – foil temperature sensors to EN 60 751 [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 07]. Prieiga per internetą: <<http://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=3937>>.
- PT100 temperature transmitter [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 10]. Prieiga per internetą: <<http://lt.rsdelivers.com/product/lkmelectronic/lkm-223-2/pt100-temperature-transmitter-24-v-25-85-c/4494358.aspx>>.
- Radiation law [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 11]. Prieiga per internetą: <<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/radiation.html>>.
- Raymond M. K. Invenios. JAV patentas. *Direct-write system and method for roll-to-roll manufacturing of reflective gratings*. US 7085057 B2. 2006 08 01.
- Resistance Temperature Detector or RTD. Construction and Working Principle [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 07]. Prieiga per internetą: <<http://www.electrical4u.com/resistance-temperature-detector-or-rtd-construction-and-working-principle/>>.
- Scales and gratings (Metrology) [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 10]. Prieiga per internetą: <<http://what-when-how.com/metrology/scales-and-gratings-metrology/>>.
- Siddiqui T.U.; Tripathi V. *Seminar on laser micromachining* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.slideshare.net/anilchaurasiya3/laser-micromachining-seminar-ppt>>.
- Šiluminio spinduliavimo tyrimas pirometru. Laboratorinis darbas [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <www.bfsk.ff.vu.lt/optika/OL25.doc>.

- Šiluminio spinduliavimo tyrimas. Laboratorinis darbas* [interaktyvus]. 2015. Aleksandro Stulginskio universitetas [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://mfitc.asu.lt/studentams/laboratoriniai-darbai/>>.
- Šviesos bangos ilgio matavimas spektroskopu. Laboratorinis darbas* [interaktyvus]. 2015. Aleksandro Stulginskio universitetas [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://mfitc.asu.lt/studentams/laboratoriniai-darbai/>>.
- Temperature Sensor - The Thermistor* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eLessonsHTML/Sensors/TempR.html>>.
- The Coefficient of Expansion Determines the Accuracy* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 08]. Prieiga per internetą: <<http://www.heidenhain.us/resources-and-news/linear-encoders-for-production-integrated-measuring-machines/>>.
- Thermistor* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 10]. Prieiga per internetą: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>>.
- Thermocouples. Using thermocouples to measure temperature* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>>.
- Thermocouple* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 10]. Prieiga per internetą: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>>.
- UAB „Precizika Metrology“; UAB „ELAS“. Mokslinių tyrimų veiklos ataskaita. 2015. *Skaidulinės inovacijos greitesniam medžiagų apdirbimui*. Vilnius
- Ultra fast laser micromachining handbook* [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.cmxr.com/Education/Introduction.html>>.
- Vekteris V. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius.
- Борейшо А. С. 1992. *Лазеры: Устройство и действие: Учебное пособие Механический институт*. Санкт Петербург.
- Рыкалин Н.Н.; Углов А.; Кокора К.Н.; 1985. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Машиностроение*. Москва.

PRIEDAI

„Mokslas – Lietuvos ateitis“ konferencijos, kuri įvyko 2016 balandžio 29 d., straipsnis.

METALINIŲ RASTRINIŲ SKALIŲ FORMAVIMO METU SUSIFORMUOJANČIOS TERMINĖS PAKLAIDOS, JŲ KOMPENSACIJA

Justinas STORTA¹, Albinas KASPARAITIS²

¹⁻²*Mechanikos inžinerijos katedra, Mechanikos fakultetas, Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, J. Basanavičiaus g. 28, Vilnius, Lietuva.*

E. paštas: ¹justinas.storta@stud.vgtu.lt; ²albinas.kasparaitis@vgtu.lt

Anotacija. Lazериu formuojant rastrines skalių struktūras ant metalo juostų dėl lazerio ir kitų šaltinių terminio poveikio vyksta juostos terminės deformacijos ir atsiranda rastrinių elementų padėties paklaidos, kurios neigiamai įtakoja gaminio kokybę. Analitiškai ir eksperimentiškai tiriami terminiai reiškiniai tiek lazerio veikimo zonoje, tiek juostos ilgyje, kuriame nusistovi terminiai procesai, grafiškai pateikiami šių tyrimų rezultatai. Sudaryta empirinė formulė ir suskaičiuotos terminės paklaidos, aprašyta jų kompensavimo metodika realiu rastrų formavimo proceso laiku.

Raktiniai žodžiai: lazerinis rastrų formavimas, vidiniai ir išoriniai temperatūros gradientai, paklaidos, kompensacija.

Įvadas

CNC apdirbimo centrai, staklės, robotiniai įrenginiai, koordinatinės matavimo mašinos bei kiti matavimo ir technologiniai įrenginiai dažniausiai veikia koordinatiniu principu, t.y. apdirbimo įrankio ar sąveikos su matavimu objektu įrenginio (matavimo galvutės) padėtis valdoma ir nustatoma pagal linijinių ar kampinių poslinkių matavimo keitiklių rodmenis, kurie yra sudėtinė įrenginių, realizuojančių koordinatines sistemas, dalis. Šių keitiklių techninės charakteristikos, visų pirma tikslumas, esminiai įtakoja minėtų apdirbimo ir matavimo įrenginių kokybinius parametrus, tikslumą.

Keitikliai gali dirbti dviem principais. Pirmu atveju paslankios ir nepaslankios skalių rastrinė sąveika peršviečiama šviesos spinduliais ir tokiu būdu suformuojami pirminiai elektriniai signalai, teikiantys informaciją apie poslinkio dydį ir kryptį. Šiuose keitikliuose naudojamos rastrinės skalės, suformuotos ant stiklo ar kitos šviesą praleidžiančios medžiagos. Skalių informacinį piešinį sudaro periodinės $20\ \mu\text{m}$ – $40\ \mu\text{m}$ pločio arba periodinės bei kodinės struktūros. Antru principu veikiančių keitiklių pirminiai elektriniai signalai formuojami atspindžio nuo pagrindinės skalės principu. Šiuo atveju taip pat naudojamos skaidrios, dažniausiai stiklinės skalės

Judesio matavimo keitikliai su stiklinėmis skalėmis turi ribotą iki 3,5–4 m matavimo ilgį, skalės medžiaga trapi, dažnai išskyla montavimo nepatogumų, pakankamai ilgas formavimo procesas [1-3]. Todėl atspindžio principu veikiančiose linijinių poslinkių matavimo sistemose yra naudojamos ant nerūdijančio plieno juostos suformuotos rastrinės skalės.

Yra nuolat tobulinamos tokių matavimo keitiklių konstrukcijos, jų gamybos technologiniai procesai. Daug techninių ir technologinių privalumų teikia lazeriniai rastrų formavimo metodai [4,5]

Tyrimo objektas

Formuojant lazериu rastrus ant nerūdijančio plieno juostos vyksta natūrali medžiagos sąveika su šiluma, perduodama nuo vidinių rastrų formavimo įrenginio arba aplinkos šaltinių. Dėl to formuojamos skalės medžiaga plečiasi arba trauktis. Toks natūralus, tačiau neigiamas procesas sąlygoja neigiamą gaminio kokybę. Šį poveikį siekiama sumažinti. Lazerinio rastrų formavimo metu susiformuoja temperatūriniai laukai, kurie įtakoja nepastovią rastrų tarpusavio padėtį, o tai yra skalės paklaidų priežastis. Tyrimu yra siekiama nustatyti susiformuojančius temperatūrinius gradientus bei temperatūrines paklaidas. Yra tiriami tiek pačios plieno juostos tiek ir rastrų formavimo aplinkos temperatūriniai gradientai. Pagal gautus duomenis yra skaičiuojamos formuojamos skalės paklaidos ir jų kompensavimo dydžiai. Eksperimentai atliekami panaudojant terminių procesų tyrimo stendą, lazerinio rastrų formavimo ant nerūdijančio plieno juostos įrenginio maketą, temperatūrų ir jų kitimo monitoringui naudojami platininiai - lustiniai jutikliai PCA 1.2010.1H, platininiai - foliniai jutikliai EN 60 751, duomenų fiksavimo įrenginys PP2 bei specialiai šiems tyrimams sumontuotas duomenų fiksavimo įrenginys.

Tyrimo rezultatai

Modeliavimas

Baigtinių elementų metodo (BEM) algoritmas yra skaitinis metodas ir vienas iš universalų sprendžiant įvairių fizinių sistemų uždavinius, todėl nebereikia gilintis į daugelį tradicinių analitinių lygčių sprendimo būdus, kurių didžiausias trūkumas yra tas, kad jie dažnai yra specifiniai kiekvienai atskirai uždavinių klasei. Metodo esmė – nagrinėjamos konstrukcijos suskaidymas į žinomo dydžio ir formos smulkesnes dalis, kurioms galime pritaikyti standartinius skaičiavimus [6].

Naudojant Galerkinio metodą galime perrašyti pagrindinę šilumos laidumo formulę į tokią formą [7]:

$$\int_V \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i dV = 0 \quad (1)$$

Įvedus skirtingumo teoremą į pirmus tris elementus ir kraštines sąlygas gauname gana ilgą formulę, tačiau ją sutraukus į bendrą visiems žinomą formą gauname tokią formulę:

$$\{q\} = -k[B]\{T\} \quad (2)$$

O pasinaudojus pastarąją gauname diskretinę baigtinių elementų formulę šilumos laidumo problemai spręsti:

$$[C]\{T\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\} \quad (3)$$

Šios formulės galima sutikti daugybe variantų. Priklausomai nuo autoriaus gali skirtis raidės bei trumpinimas. Kiekvienas formulės elementas yra išsprendžiamas atskirai. Tačiau toks sprendimo būdas yra labai ilgas ir sudėtingas todėl yra pasinaudojama specialiomis kompiuterinėmis programomis, kurių veikimas paremtas baigtinių elementų metodu.

Terminių procesų, vykstančių plieno juostoje veikiant lazerio spinduliui, modeliavimas atliktas COMSOL Multiphysics programa skaičiuojant šiluminio laidumo lygtį sugertam Gausiniam impulsui. Laidumo lygtis [8]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + q, \quad (4)$$

čia ρ medžiagos tankis, κ medžiagos šiluminis laidumas, q šilumos tankis, T temperatūra, C šiluminė talpa ir t yra laikas. Modeliavimui naudojami lazerio parametrai pateikiami 1 lentelėje.

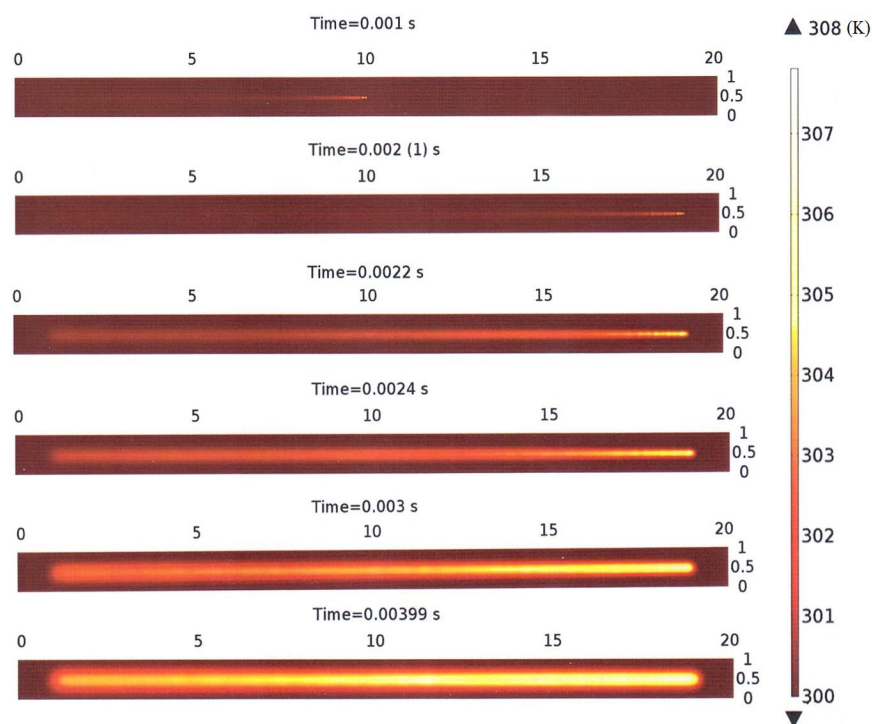
1 lentelė. Lazerio parametrai

Parametrai	Reikšmė
Lazerio bangos ilgis	532 nm
Spinduliuotės vidutine galia	2 W
Pluošto diametras fokuse (gylyje 1/e)	15 μm
Impulso energija	0,3 μJ
Pradinė temperatūra	20 °C
Impulso trukmė	10 ps
Atspindžio koeficientas	0,56 a.b.
Absorbcijos koeficientas	$6,3 \cdot 10^5 cm^{-1}$

Eksperto supaprastinimui panaudojamas mažas plonos metalinės (AISI 314) juostelės plotas, kurios matmenys: plotis 20 mm, ilgis 1 mm, storis 0,5 mm. Lazeris juda vidutiniu $v_x = 2 mm/s$ greičiu. Vieno režio formavimo trukmė ir laiko tarpas tarp vieno režio pabaigos ir kito pradžios yra 2 ms – 0,002 s.

Modeliavimu nustatytas šiluminio lauko dydis ir jo judėjimas atskiro rastrinio elemento formavimo metu, vidutinė skalės temperatūra ir jos susilyginimo su aplinkos temperatūra trukmė formuojant užduoto ilgio skalės atkarpą, terminų deformacijų dydis išilgai skalės. Modeliavimo rezultatų iliustracijai 1 pav. pateikta temperatūrų pasiskirstymo grafikai lazerio spindulio veikimo zonoje rastrinio elemento formavimo metu skirtingais laiko momentais. Šie modeliavimo rezultatai rodo, kad paties rastro formavimo metu temperatūra yra praktiškai lygi pradiniai ir pradeda kilti tik rastro formavimo pabaigoje t.y. praėjus 0,002 s. Lazeris juda greičiau nei šilumos banga, tokį teiginį patvirtina

sekantys vidinių temperatūrinių gradiento pasiskirstymo eksperimentai. Po rastro formavimo praėjus 0,002 s juostelės temperatūra pakyla 5°C laipsniais.



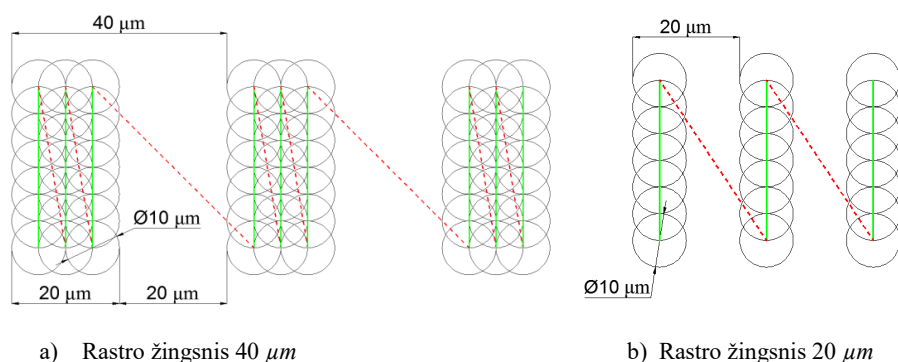
1 pav. Temperatūrų pasiskirstymai formavimo metu ir po jo [9]

Eksperimentiniai tyrimai.

Vidinių temperatūrinių gradiento pasiskirstymo eksperimentas

Bandymai atliekami formuojant du dažniausiai naudojamus rastro žingsnius 20 μm ir 40 μm bei ištisai paveikiant ruošinio paviršių - sudarant foną. 1 mm ilgio rastro suformuojamas 3333 lazerio spindulio impulsais. Lazerio spindulio pluošto skersmuo lygus 10 μm .

Formuojant rastrą, skenavimo žingsnis išilgai rastro ašies lygus 5 μm . Lazerio spindulio judesio trajektorija formuojant skirtingo žingsnio rastrus yra atvaizduota 2 pav.



2 pav. Lazerio spindulio judesio trajektorija formuojant skirtingo žingsnio rastrus.

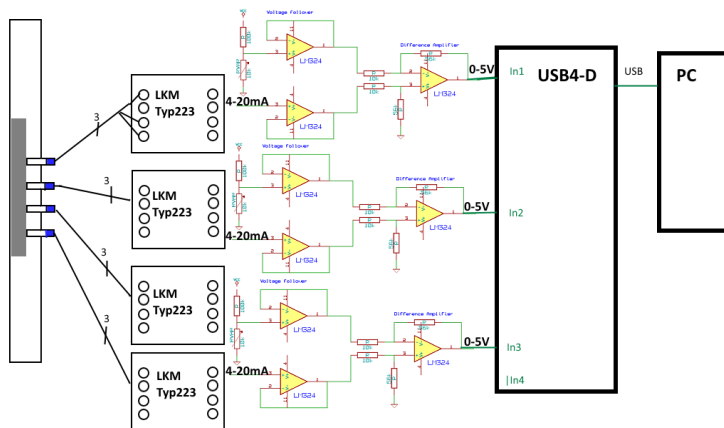
Užduodami rastrų formavimo parametrai nurodyti 2 lentelėje.

2 lentelė. Lazerio judesio greičio ir laiko parametrai.

Formavimas	Lazerio slinkimo greitis		Rastrų formavimo laikas, s.
	Išilgai juostos	Skersai juostos	
40 μm	0,98 mm/s	9 m/s	48
20 μm	7,1 mm/s	9 m/s	7
Fonas	2,1 mm/s		24

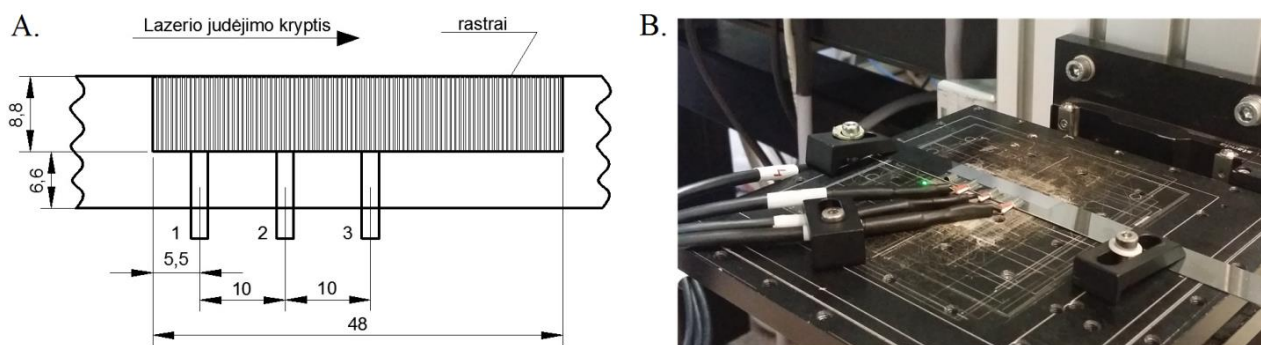
Bandymams naudojama WESTIG® 1.4028MO nerūdijančio plieno juostos ruošinys, kurio matmenys yra 250x15,4x0,5 mm. Bandymų metu juostelė buvo fiksuota, o lazerio spindulio judesys išilgai ir skersai juostos realizuotas skaneriu ScanLab IntelliSCAN 14.

Visiems temperatūros tyrimams yra naudojama ta pati matavimo schema, kuri susideda iš tokių elementų: kompiuterio, USB4-D jutiklių duomenų surinkimo įrenginio, mažos galios kvadratūrinių operacinių stiprintuvų LM324, LKM 223 temperatūrinio imtuvo, platininių PT100 temperatūros jutiklių bei skaitmeninio termometro „OMEGA HH41“. Matavimo sistemos schema parodyta 3 pav.



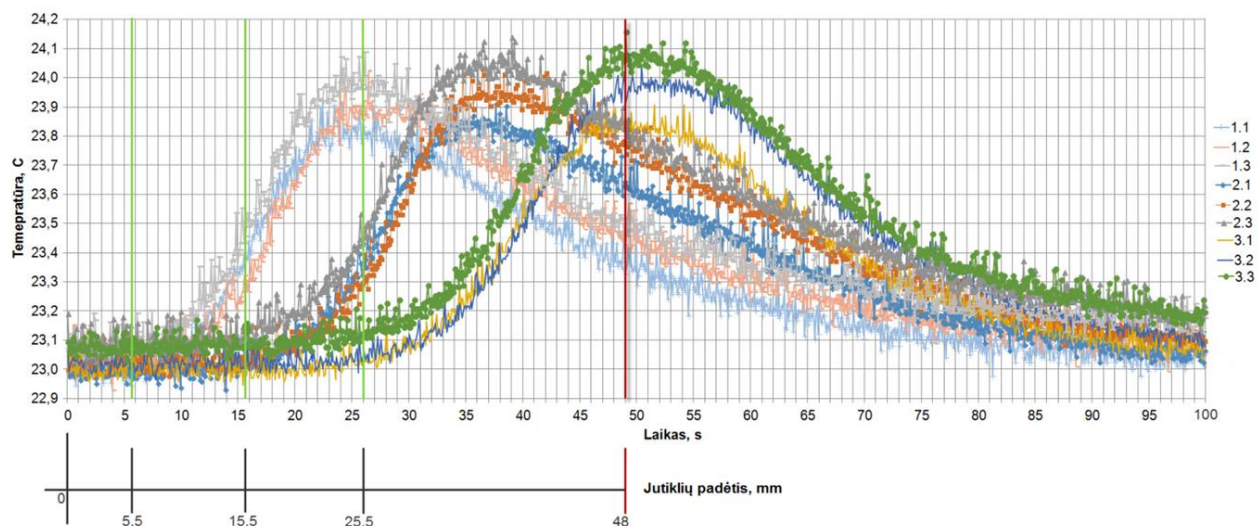
3 pav. Temperatūros tyrimams naudojama duomenų rinkimo ir kaupimo schema

Eksperimento metu sinchronizuotas lazerio įjungimas ir duomenų nuskaitymas. Tai leidžia nustatyti lazerio spindulio padėtį temperatūros sklidimo grafike. Jutiklių išsidėstymo schema ir atvaizduota 4 pav.



4 pav. Juostos temperatūros veikiant lazerio spinduliui matavimo stendas A) jutiklių išsidėstymo schema; B) juostos su jutikliais vaizdas.

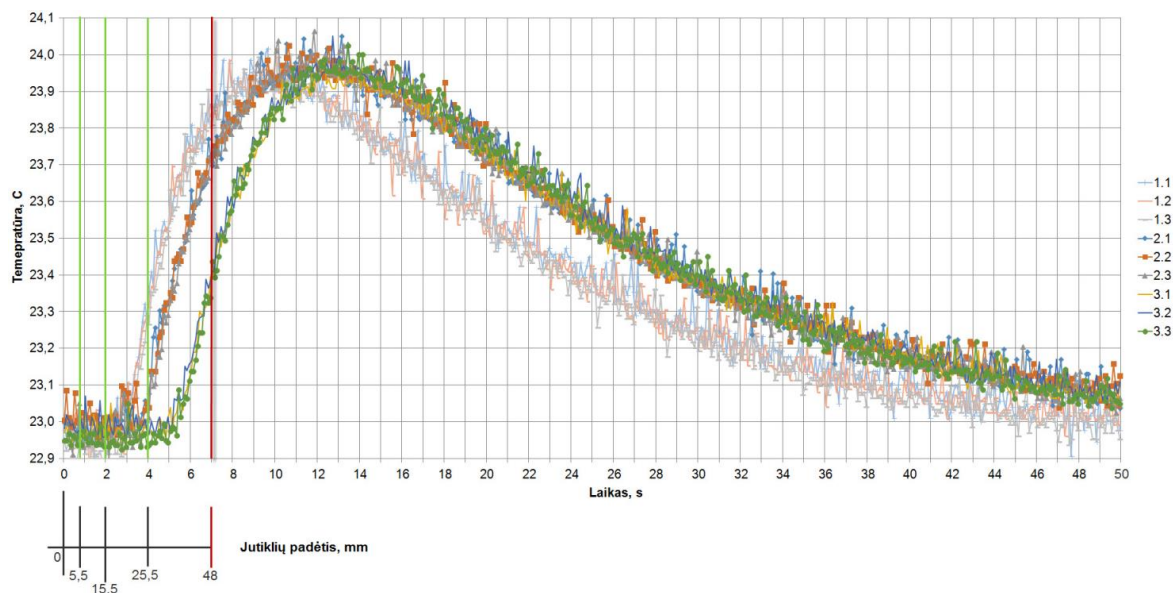
Šio tyrimo rezultatai formuojant skirtingo žingsnio rastrus grafiškai pateikti 5 ir 6 pav. Grafikai rodo trijų realizacijų trijų jutiklių temperatūros kitimo rodmenis nuo lazerio įjungimo momento iki ji tampa artima aplinkos temperatūrai. Formuojamas 48 mm ilgio rastrinis takelis.



5 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 40 μm rastrą.

Iš 5 pav. pateiktų rezultatų matome, kad temperatūrų maksimumai yra nevienodi formavimo kartojimo atžvilgiu: pirmojo formavimo trijų jutiklių temperatūrų maksimumai siekia 23,9 °C, $\Delta T = 1$ °C; antrojo formavimo 24 °C, $\Delta T = 1,1$ °C; trečiojo 24,1 °C, $\Delta T = 1,1$ °C; pradinė-norminė temperatūra yra panaši 22,9 – 23 °C visiems kartojimo atvejams. Tokių temperatūros nevienodumą gali sąlygoti tai, kad lazerio spindulys gali įsiskverbti vis į gilesnius juostelės sluoksnius, šiluma labiau koncentruojasi. Kuomet lazerio spindulys yra ties pirmu jutikliu temperatūros maksimumas, kurį fiksuoja pirmas jutiklis yra pasiekiamas tik po 25 s; esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu temperatūrinės bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis yra pasiekiamas po 37 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos bangos maksimumas pasiekiamas tik po 52 s. Taigi šilumos banga viso apdirbimo metu yra atsiliekanči, lazeris juda greičiau už bangą.

6 pav. pateikti rezultatai, gauti formuojant 20 μm žingsnio rastrinį takelį. Formavimo parametrų pasikeitimą sąlygoja, tai kad pasikeičia lazerio judesio trajektorija, kaip parodyta 2 pav. Lazerio judėjimo greitis padidėja, nes laikas vieno rastro formavimui yra apie 4,6 ms, kuomet formuojant 40 μm jis buvo apie 15 ms. Taip pat nėra kartojimo ir didelio tarpelio. Todėl temperatūros matavimo laikas sumažinamas iki 50 s.



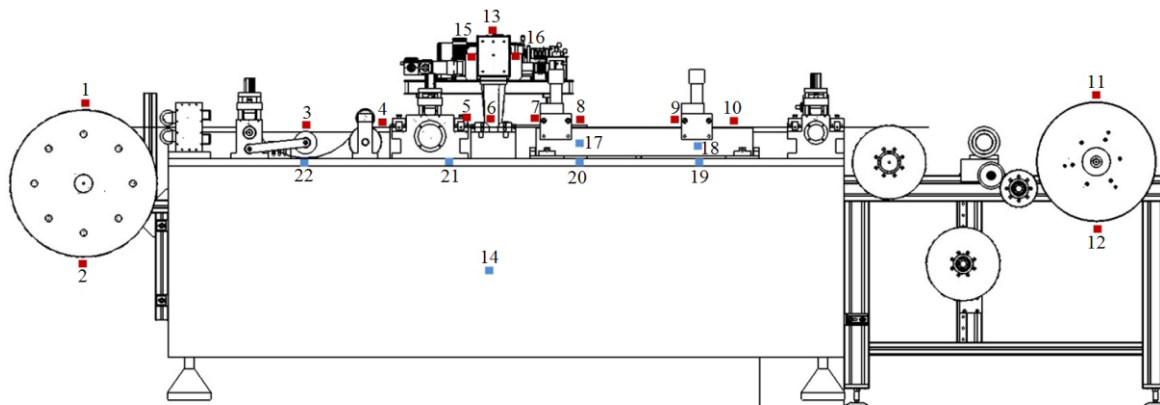
6 pav. Juostos temperatūros kitimas skirtinguose taškuose formuojant 20 μm rastrą.

Šio bandymo metu visi trys kartojimai yra panašūs, dėl to gauname, kad grafikai "užlipę" vienas ant kito. Temperatūrų maksimumai visuose jutikliuose siekia 24 – 24,1 °C, $\Delta T = 1,1 – 1,2$ °C; pradinė-norminė temperatūra yra panaši 22,9 – 23 °C, jai pasiekti užtenka ir fiksuojamojo laiko bei šilumos kritimas yra ne toks status lyginant su pirmu bandymu, temperatūra krinta tolygiau. Kuomet lazerio spindulys yra ties pirmu jutikliu temperatūros maksimumas, kurį fiksuoja pirmas jutiklis yra pasiekiamas po 10 s; esant lazerio spinduliui ties antru jutikliu

temperatūrinės bangos maksimumas, kurį fiksuoja antras jutiklis yra pasiekiamas po 12 s, ir pasiekus trečiąjį jutiklį šilumos bangos maksimumas pasiekiamas po 13 s. Dėl didelio išilginio greičio lazerio spindulys greičio pereina per juostą ir aušimas vyksta jau jam sustojus.

Išorinių temperatūrinių gradientų tyrimas skalės formavimo aplinkoje

Tyrimai atkelti panaudojant metalinių skalių formavimo lazeriu įrenginio maketą. Specifinėse termiškai aktyviose vietose, 1 cm aukštyje virš juostos, sumontuojami 22 temperatūros jutikliai, kurių padėtis nurodyta 7 pav. Jutikliai yra sujungti į PP2 temperatūros matuoklį iš kurio rezultatai perduodami į kompiuterį.

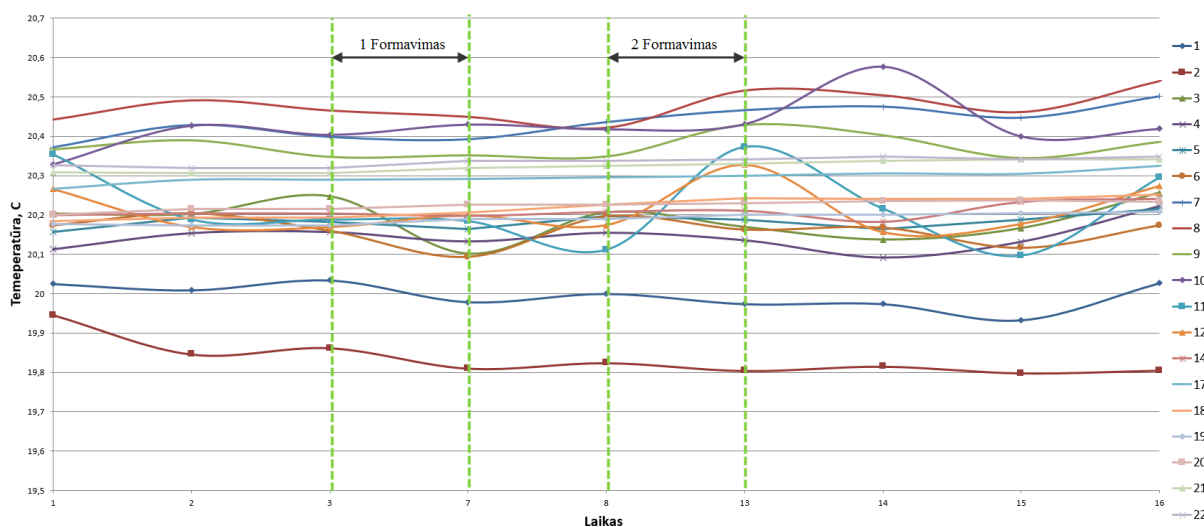


7 pav. Jutiklių išdėstymo schema visame įrenginio ilgyje

Temperatūrų kitimas matuojamas dviem juostos formavimo ilgiams: 400 mm ir 1000 mm. Formuojamas $40\ \mu\text{m}$ žingsnio rastras. Prieš matavimą sistema yra paliekama nusistovėti iki pastovios temperatūros. Toliau įjungiami darbiniai kompiuteriai, lazerinė sistema, galios matavimo sistema ir visas įrenginys darbinėje būsenoje išlaikomas iki temperatūrų nusistovėjimo. Atlikus lazerinės sistemos, juostos traukimo mechanizmų ir jutiklių kalibravimo nustatymus yra paleidžiamas įrenginys t.y. pradedami formuoti rastrai.

Eksperimento metu, 8 pav., yra formuojami 400 mm, 3-7 taškai ir 1000 mm, 8-13 taškai, ilgio rastrinės struktūros. Taškų tarpas gaunamas dėl trikdžių, kuriuos sukelia pavaros ir lazerinė sistema, temperatūriniai jutikliai nieko nefiksuoja, šių trikdžių neįmanoma išvengti, kadangi visa sistema yra vienoje patalpoje.

Rezultate gaunamas sąlyginai pastovus temperatūrų išsidėstymas, ypač ties tais jutikliais kurie yra ant granito, tačiau egzistuoja ir tam tikri šuoliai priklausomai nuo ilgio. Labiausiai išsiskiria antrojo formavimo 11-12 jutikliai, kurių $\Delta T = 0,2 - 0,25\ ^\circ\text{C}$, jie yra ties juostos susukimo ritiniu, taip pat 8-9 jutikliai $\Delta T = 0,1\ ^\circ\text{C}$, kurie yra ties pirmu mikroskopu, tai vyksta dėl to, kad jiems reikia daugiau energijos patikrinti juostos kokybę.



8 pav. Rastrų formavimo įrenginio temperatūrų pasiskirstymas formuojant rastrus.

Eksperimentas buvo pakartotas su mažesniu jutiklių kiekiu naudojami tik 5, 6, 7, 8 ir 17 jutiklius, nagrinėjamas juostos apdirbimas lazerio-mikroskopo dalyje. Buvo kartojami formavimai, du po 400 mm (apie 5 min. kiekvienas) ir du po 1000 mm (apie 10 min. kiekvienas). Rezultate gaunami labai panašūs rodmenys. ΔT tarp 6 ir 7 jutiklių yra pastovi

0,2 °C, tačiau labiausiai išryškėja 8 jutiklio duomenys, kadangi kartojant rastrų formavimus juosta šyla vis labiau, bet krenta ties antru 1000 mm formavimu. Bendroje tendencijoje gaunama, kad formavimo ilgis turi įtakos temperatūroms.

Terminių paklaidų kompensacija

Matmenų pokytis tiesiogiai priklauso nuo temperatūros pokyčio, linijinio plėtimosi koeficiento ir matmenų. Skalės matmenys laikomi tikrais, kai jos temperatūra lygi norminei, $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Tačiau kalibruojamos skalės temperatūra, dėl lazerinio apdirbimo, aerostatinų guolių ir kitų komponentų poveikio, nėra lygi norminei, nėra pastovi visame įrenginio ilgyje bei kalibruojant kinta. Tokiu būdu susiformuoja kintančios laike ir skalės ilgyje paklaidos.

Rastrų tarpusavio padėties kitimo, t.y. skirtingų tarpų tarp rastrų, atsirandančio dėl lazerio spindulio temperatūrinio poveikio ir kitų priežasčių, nustatymui yra naudojami du mikroskopai su CCD kameromis, įtvirtinti tarpusavyje tiksliai bei pastoviai 500 mm atstumu. 9 pav. parodytas temperatūros kitimas skalės atkarpoje tarp dviejų mikroskopų, atsirandantis dėl lazerio ir kitų skalės formavimo aplinkoje esančių temperatūrinių trikdžių..



9 pav. Juostos skerspjūvio vidutinio temperatūrinio gradiento pasiskirstymas tarp M1 ir M2 esant lazerio ir aplinkos įtakai

Kadangi skalė formuojama termiškai nusistovėjus sistemai termokonstancinėje laboratorijoje, kurioje palaikoma pastovi aplinkos temperatūra, temperatūrinės deformacijos ΔL_T juostos ilgyje $L=500$ mm tarp pirmojo M1 ir antrojo M2 mikroskopų priimamos pastovios. Pasinaudojus funkcija (5) temperatūrinės deformacijos vidutinės paklaidos skaitinė reikšmė esant lazerio poveikiui suskaičiuoti:

$$\Delta T(x) = 15,1 \cdot \int_0^{0,5} \left((0,5^x) * 0,8 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) dx \quad (5)$$

Tačiau šis dydis nėra baigtinis, kaip dar vieną dydį priimame aplinkos įtaką temperatūrinės deformacijos reikšmei, šis dydis apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$\Delta T(y) = 15,1 \cdot \int_0^{0,5} \left((0,45^x) * 0,9 + e^{\frac{\sqrt{6}+6}{\sqrt{8}}} \right) dx \quad (6)$$

Gaunama temperatūrinės deformacijos vidutinės paklaidos reikšmė: $\Delta L_T = \Delta T(x) + \Delta T(y) = 5,118 + 5,602 = 10,72 \mu\text{m}$. Šis dydis paimtas su priešingu ženklu, atitinka paklaidų kompensacinę reikšmę.

Išvados

1. Modeliavimo keliu nustatytas liniuotės vidutinės temperatūros pokytis kelioms charakteringoms būsenoms. Nors temperatūra lazerio spindulio zonoje yra labai aukšta, siekia iki 450°C , tačiau per trumpą laiko tarpą dėl šilumos laidumo pasklinda skalės tūryje ir vidutinė skalės temperatūra pakyla nežymiai.
2. Formuojant $20 \mu\text{m}$ žingsnio rastrą, kuomet lazerio spindulys veikia su periodiškai besikartojančiomis pertraukomis, temperatūros pokytis ΔT rastrų formavimo paviršiuje svyruoja nuo $0,95^\circ\text{C}$ iki $1,05^\circ\text{C}$. Šiluminės bangos

sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje mažesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greitį išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 10 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 50 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

3. Temperatūros priešingoje ruošinio pusėje ΔT svyruoja nuo 1,7°C iki 2,3°C. Šiluminės bangos sklidimo greitis nežymiai mažesnis negu lazerio spindulių pluošto slinkimo greitis išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 7 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 55 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

4. Formuojant 40 μm žingsnio rastrus viršutiniame paviršiuje temperatūros pokytis ΔT svyruoja nuo 0,7°C iki 1,05°C. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje artimas lazerio spindulių pluošto slinkimo greičiui išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 20 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 120 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

5. Priešingoje juostos pusėje ΔT svyruoja nuo 2,3°C iki 2,9°C. Šiluminės bangos sklidimo greitis temperatūros jutiklių išdėstymo juostoje didesnis už lazerio spindulių pluošto slinkimo greičiui išilgai ruošinio. Jutiklio temperatūros rodmenys maksimalias reikšmes įgauna maždaug po 7 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį. Pradinę temperatūrą jutiklių rodmenys pasiekia po 100 s skaičiuojant nuo momento, kai lazerio spindulys praeina pro jutiklį.

6. Vidinių ir išorinių temperatūrinių gradientų tyrimais nustatyta, kad po tam tikro laiko nuo sistemos įjungimo nusistovi terminė aplinka, kai procesą techniniams tikslams pakankamu tikslumu galima laikyti stabiliu.

7. Sukurta ir išbandyta terminių paklaidų kompensacija realiu darbo laiko masteliu. Tirtajai sistemai nustatyta pastovi kompensacinio dydžio reikšmė lygi - 10,72 μm .

Literatūra

1. Sanchez-Brea L.M., Morlanes T. 2008 „Metrological errors in optical encoders“. Ispanija.
2. <http://what-when-how.com/metrology/scales-and-gratings-metrology/> [interktyvus]. [2016 02]
3. Kojima T., Kikuchi Y., Seki Sh., Wakiwaka H.. 2004. „Study on High Accuracy Optical Encoder with 30 bits“. Japonija.
4. Li, J. W., Zhang, W.J., Yang, G.,S. Tu, S.D., Chen X.B. 2009. „Thermal-error modeling for complex physical systems: the-state-of-arts review“. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
5. Yang, H. 2002. „Dynamic Modeling for Machine Tool Thermal Error Compensation“. Daktaro disertacija. Mičigano universitetas.
6. Roland W. Lewis; Nithiarasu P. 2004. „Fundamentals of the Finite element method for heat and fluid flow“. Londonas.
7. Nikishkov G.P. 2010. „Programming Finite Elements in Java“. Londonas.
8. COMSOL Multiphysics standartinė formulė naudojama šiluminiams uždaviniams spręsti.
9. Fizinių ir technologinių mokslų centro (FMTC) laboratorijos atlikta modeliavimo ataskaita.