



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Lazerinio pjovimo parametrų įtakos „fiber“ tipo lazerio
pjovimo kokybei tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Laura Čepauskaitė

Projekto autorė

prof. Regita Bendikienė

Vadovė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lazerinio pjovimo parametrų įtakos „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Laura Čepauskaitė
Projekto autorė

prof. Regita Bendikienė
Vadovė

lekt. Virginija Gylienė
Recenzentė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Laura Čepauskaitė

Lazerinio pjovimo parametrų įtakos „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Laura Čepauskaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentei – Laurai Čepauskaitei

1. Projekto tema –

Lazerinio pjovimo parametrų įtakos „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei tyrimas

(Lietuviškai)

Investigation of the Influence of Laser Cutting Parameters on the Quality of Fiber Laser Cutting

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti lazerinio pjovimo parametrų įtaką „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei.

Uždaviniai:

1. atlikti pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimus;
2. įvertinti lazerinio pjovimo tikslumą;
3. įvertinti pjūvio geometrijos taisyklingumą;
4. įvertinti lazerio terminio poveikio zonos morfologiją;
5. sukurti dirbtiniais neuroniniais tinklais pagrįstą modelį lazerinio pjovimo kokybės charakteristikoms optimizuoti;
6. apibrėžti lazerinio pjovimo technologijų taikymo socio-ekonominius padarinius.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

„Fiber“ tipo lazerinio pjovimo įrenginys Prima Power Platino Fiber 1530, plienas S355JR, standartas ISO 9013:2017 terminiu pjovimu apdirbamoms detalėms.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorė	Laura Čepauskaitė	2023-10-02
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>
		<i>(Data)</i>

Vadovė	Regita Bendikienė	2023-10-02
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>
		<i>(Data)</i>

Krypties studijų programų vadovė	Regita Bendikienė	2023-10-02
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>
		<i>(Data)</i>

Čepauskaitė, Laura. Lazerinio pjovimo parametrų įtakos „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovė prof. Regita Bendikienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybos inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: lazerinis pjovimas; „fiber“ lazeris; pjovimo kokybė; tikslumas; proceso parametrai.

Kaunas, 2024. 58 p.

Santrauka

Lazerinis pjovimas yra vienas iš netradicinių medžiagų apdirbimo metodų. Viena naujausių lazerinio pjovimo technologijų yra „fiber“ tipo lazeriai, kurie pasižymi itin dideliu proceso našumu, pjovimo tikslumu bei aukšta pjovimo kokybe apdirbant plonas medžiagas. Vis dėlto, tokio tipo lazeriu apdirbant storesnes medžiagas pjovimo kokybė suprastėja, todėl ypač svarbūs tampa pjovimo proceso įvesties parametrai. Šiame projekte buvo ištirta lazerio galios, pjovimo greičio, pagalbinių deguonies dujų slėgio įtaka „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei. Visų pirma, keičiant „fiber“ tipo lazerio pjovimo parametrus buvo išpjauti 4 ir 6 mm storio mažo anglingumo plieno S355JR bandiniai. Siekiant įvertinti kiekvieno parametrų rinkinio įtaką pjovimo kokybei buvo išmatuotas bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumas, įvertintas bandinių matmenų bei pjūvio geometrijos tikslumas. Be to, norint įvertinti lazerio terminį poveikį pjaunamai medžiagai buvo atlikta mikroskopinė mikrostruktūros analizė lyginant terminio poveikio zoną su temperatūros nepaveikta likusia metalo lydiniu dalimi. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad lazerinis pjovimas yra sudėtingas procesas, kurio vykdymui ir galutinei pjovimo kokybei itin didelę įtaką turi tinkamas pjovimo parametrų parinkimas. Dėl šios priežasties siekiant pasiekti optimalią pjovimo kokybę buvo sukurtas dirbtiniu intelektu pagrįstas dirbtinis neuroninis tinklas, kuriam apmokyti buvo panaudoti gauti kokybės charakteristikų matavimo rezultatai. Naudojant sukurtą proceso optimizavimo modelį buvo apskaičiuoti proceso parametrai, su kuriais pjovimo kokybė būtų optimali. Tam, kad būtų įvertintas optimizavimo modelio veikimo tikslumas naudojant apskaičiuotas parametrų vertes buvo išpjauti bandiniai bei atlikti jų kokybės charakteristikų matavimai, kurių rezultatai palyginti su dirbtinio neuroninio tinklo prognozuotomis vertėmis. Taigi, tokie lazerinio pjovimo proceso tyrimai siekiant optimalios kokybės yra itin svarbūs ne tik didinant proceso efektyvumą, mažinant nekokybiškų gaminių kiekį, tačiau ir užtikrinant lazerinio pjovimo būdu gaminamų detalių ilgaamžiškumą bei įgyvendinant tvarios gamybos idėjas.

Čepauskaitė, Laura. Investigation of the Influence of Laser Cutting Parameters on the Quality of Fiber Laser Cutting. Master's Final Degree Project, supervisor prof. Regita Bendikienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: laser cutting; fiber laser; cutting quality; accuracy; process parameters.

Kaunas, 2024. 58 p.

Summary

Laser cutting is one of the non-traditional methods used for material machining. The latest laser cutting technology is fiber lasers, which are notable for their high process efficiency, cutting precision and high cutting quality for thin materials. However, the quality of the cut is significantly decreased when machining thicker materials, which makes the input parameters of the cutting process very important. For this reason, the influence of laser power, cutting speed and assisted gas pressure on the cutting quality of the fibre laser was investigated in this project. Firstly, 4 mm and 6 mm thick specimens of low carbon steel S355JR were cut by changing the cutting parameters. In order to evaluate the influence of the cutting parameters on the cut quality, the surface roughness, dimensional accuracy and kerf taper were measured. Furthermore, to evaluate the thermal effect of the laser, microscopic analysis of the microstructure was carried out by comparing the heat-affected zone with the remaining bulk of the material not affected by the high temperature. The results of the investigations show that laser cutting is a complex process, which performance and the final quality of the cut are strongly influenced by the correct choice of cutting parameters. For this reason, in order to achieve optimum cutting quality, an artificial neural network was created and trained using the results received from the measurement of the quality characteristics. To evaluate the accuracy of the optimisation model, new specimens were cut using the calculated optimum parameters values and quality measurements were made. The results of these measurements were compared with the values predicted by the artificial neural network. Such investigations of the laser cutting process on purpose to achieve optimum quality are very important not only for increasing the efficiency of the process, reducing the number of low-quality products, but also for ensuring the longevity of laser cut parts and implementation of sustainable manufacturing ideas.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Lazerinio pjovimo procesas metalų apdirbimo pramonėje.....	13
1.1. Lazerio veikimo principas	13
1.2. Lazerių tipai.....	14
1.3. Tipinės lazerinio pjovimo kokybės problemos.....	15
1.4. Lazerinio pjovimo kokybės defektų priežastys	16
1.5. Lazerinio pjovimo kokybės tyrimai.....	18
1.6. Skyriaus apibendrinimas	20
2. Lazerinio pjovimo kokybės tyrimo metodika	21
2.1. Bandinių pjovimas.....	21
2.2. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas	24
2.3. Matmenų ir pjūvio geometrijos tikslumo matavimas.....	25
2.4. Lazerio terminio poveikio tyrimas	27
2.5. Dirbtinio intelekto taikymas lazerinio pjovimo kokybės problemų sprendimui	29
2.6. Skyriaus apibendrinimas	30
3. Lazerinio pjovimo kokybės charakteristikų kiekybinis ir kokybinis vertinimas.....	31
3.1. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas	32
3.2. Matmenų tikslumo vertinimas.....	35
3.3. Pjūvio geometrijos taisyklingumo vertinimas	38
3.4. Lazerio terminio poveikio vertinimas	42
3.5. Lazerinio pjovimo kokybės optimizavimas.....	47
3.6. Skyriaus apibendrinimas	49
4. Netradicinių apdirbimo technologijų taikymo socio-ekonominiai padariniai.....	50
4.1. Netradicinių apdirbimo metodų taikymo poveikis aplinkai ir ekonomikai.....	51
4.2. Skyriaus apibendrinimas	52
Išvados	53
Literatūros sąrašas	55
Priedai.....	59
1 priedas. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai	59
2 priedas. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai	60
3 priedas. 4 mm storio bandinių matmenų matavimo rezultatai	61
4 priedas. 6 mm storio bandinių matmenų matavimo rezultatai	68
5 priedas. Dalyvavimo jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Industrial Engineering 2023 Circular Economy: Production and Consumption“ sertifikatas	75

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindinių CO ₂ ir „fiber“ lazerių charakteristikų palyginimas [8]	14
2 lentelė. Įvairių medžiagų šiluminės savybės [20]	18
3 lentelė. Plieno S355JR cheminė sudėtis [27]	21
4 lentelė. Plieno S355JR mechaninės savybės [26, 27]	21
5 lentelė. <i>Platino Fiber 1530</i> techninės specifikacijos [28].....	22
6 lentelė. 4 mm storio bandinių pjovimo parametrai	31
7 lentelė. 6 mm storio bandinių pjovimo parametrai	31
8 lentelė. 4 mm storio bandinių terminio poveikio zonos matavimo rezultatai	46
9 lentelė. 6 mm storio bandinių terminio poveikio zonos matavimo rezultatai	47
10 lentelė. Apskaičiuoti optimalūs pjovimo parametrai	48
11 lentelė. 4.13 bandinio prognozuotos ir realios kokybės charakteristikų vertės.....	48
12 lentelė. 6.13 bandinio prognozuotos ir realios kokybės charakteristikų vertės.....	49
13 lentelė. CO ₂ ir „fiber“ tipo lazerių ekonominis efektyvumas [39].....	52

Paveikslų sąrašas

1 pav. Lazerio veikimo principas: a) vaizdas iš šono; b) vaizdas iš viršaus [4]	13
2 pav. Paviršiaus šiurkštumas [13].....	15
3 pav. Pjūvio kūgiškumas [14].....	15
4 pav. Lazerinio pjovimo kokybę lemiantys veiksniai.....	17
5 pav. Skirtingos konstrukcijos lazerio antgaliai [9].....	17
6 pav. Lazerinio pjovimo įrenginys <i>Platino Fiber 1530</i> [28]	21
7 pav. Lazerio pjovimo kelias bandiniui apdirbti.....	22
8 pav. Lazerinio pjovimo procesas.....	23
9 pav. Lazerio antgalis	23
10 pav. Šiurkštomatis <i>Mitutoyo SJ-210</i>	24
11 pav. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas	25
12 pav. Bandinio eskizas matmenų tikslumui matuoti	25
13 pav. Koordinatinė matavimo mašina <i>Mitutoyo CRYSTA-Apex 9106</i> [32].....	26
14 pav. Matmenų tikslumo matavimas	26
15 pav. Terminio poveikio tyrimo bandinio išpjovimo vieta.....	27
16 pav. Įrenginys mikrošlifams gaminti <i>LAM PLAN SMARTLAM 2.0</i> [33].....	27
17 pav. Įtvirtinti ruošiniai.....	28
18 pav. Ruošinių paviršiaus šlifavimas	28
19 pav. Mikroskopas <i>Zeiss AXIO Scope.A1</i> [34].....	28
20 pav. DNT kūrimo žingsniai [35]	30
21 pav. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo kitimas.....	32
22 pav. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	33
23 pav. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo kitimas.....	33
24 pav. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	34
25 pav. 4 mm storio bandinių pjovimo tikslumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	35
26 pav. 6 mm storio bandinių pjovimo tikslumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	36
27 pav. 4 mm storio bandinių matmenų nuokrypos kitimas	37
28 pav. 6 mm storio bandinių matmenų nuokrypos kitimas	37
29 pav. 6.11 bandinio pjūvio kūgiškumas.....	38
30 pav. 4 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	39
31 pav. 6 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p	40
32 pav. 4 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo kitimas.....	41
33 pav. 6 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo kitimas.....	41
34 pav. Terminio poveikio tyrimo bandiniai	42
35 pav. Plieno S355JR mikrostruktūra po lazerinio pjovimo proceso.....	43
36 pav. 4 mm storio bandinių mikrostruktūros: a) 4.03 bandinys; b) 4.06 bandinys; c) 4.11 bandinys	43
37 pav. 4.03 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	43

38 pav. 4.06 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	44
39 pav. 4.11 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	44
40 pav. 4 mm storio bandinių vidutinio terminio poveikio kitimas.....	44
41 pav. 6 mm storio bandinių mikrostruktūros: a) 6.02 bandinys; b) 6.08 bandinys; c) 6.11 bandinys	45
42 pav. 6.02 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	45
43 pav. 6.08 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	45
44 pav. 6.11 bandinio terminio poveikio zonos matavimas.....	46
45 pav. 6 mm storio bandinių vidutinio terminio poveikio kitimas.....	46
46 pav. Sukurto dirbtinio neuroninio tinklo struktūra.....	47
47 pav. Pagrindinės kliūtys žiedinės ekonomikos idėjoms įgyvendinti [46].....	51
48 pav. Lazerinio pjovimo proceso srauto diagrama [47].....	51

Įvadas

Įprastai detalių mechaniniam apdirbimui naudojami tradiciniai apdirbimo metodai (tekinimas, frezavimas, gręžimas ir kt.), kurių metu sukantis ruošiniui ar įrankiui nuimama drožlė. Kadangi šių technologinių procesų metu naudojami įvairūs keičiami pjovimo įrankiai, jie pasižymi universalumu bei gali būti panaudojami sudėtingos konstrukcijos detalėms gaminti. Vis dėlto, jeigu norima greitai pagaminti nesudėtingą detalę, kurios apdirbimas susideda iš išorinio bei vidinio kontūro elementų (pvz., skylės, įvairios išpjovos ir kt.) pjovimo, tuomet tradicinės frezavimo, gręžimo operacijos dažnai keičiamos modernesniais netradiciniais pjovimo metodais, tokiais kaip lazerinis pjovimas, plazminis pjovimas, pjovimas abrazyvine vandens srove ar kitais. Šie metodai skiriasi nuo įprastų apdirbimo būdų savo veikimo principu, nes apdirbimo metu nereikia tiesioginio kontakto tarp įrankio ir pjaunamo ruošinio. Medžiaga apdirbama veikiant įvairių rūšių energijai (pvz., mechaninei, cheminei, šiluminei ir kt.), kurios tipas priklauso nuo pasirinkto pjovimo būdo. Lazerinio pjovimo procesas yra pagrįstas šiluminės energijos poveikiu, nes didelės galios lazerio spindulys įkaitina ir išlydo pjaunamą medžiagą, kuri pagalbinėmis pjovimo dujomis pašalinama iš pjūvio zonos. Nors lazerinis pjovimas, kaip ir kiti minėti netradiciniai apdirbimo metodai, suteikia naujas mechaninio apdirbimo galimybes, tačiau turi ir trūkumų, susijusių su detalių kokybės defektais. Vykdamas lazerinio pjovimo procesą susiduriama su dideliu paviršiaus šiurkštumu, nepakankamu matmenų ir pjūvio geometrijos tikslumu, šlakais ar temperatūros paveikta zona. Tokių lazerinio pjovimo kokybės problemų sprendimas yra ypač svarbus, nes nepakankama gaminamų detalių kokybė gali turėti įtakos jų ilgaamžiškumui, patikimumui [1]. Dėl šios priežasties mokslininkai, siekdami nustatyti lazeriu apdirbamų detalių kokybės defektų priežastis, atlieka įvairius tyrimus. Pagrindinė tyrimų kryptis – lazerinio pjovimo įvesties parametru (pjovimo greičio, lazerio galios, pagalbinių dujų tipo, slėgio ar lazerio spindulio fokusavimo atstumo) įtaka detalių kokybei bei geriausių parametru rinkinių paieška. Reikia paminėti, kad dažnai parametru parinkimas tampa komplikuoatas, kai keičiant pjovimo parametrus vienu kokybės charakteristikų vertės yra gerinamos, tačiau tuo pat metu kitos charakteristikos blogėja. Norint to išvengti itin efektyvu atlikti optimizavimą, kurio metu gali būti randamos įvesties parametru reikšmės, su kuriomis pjovimo kokybė būtų optimali, t. y. visos vertinamos charakteristikos atitiktų bent minimalius reikalavimus. Siekiant automatizuoti gamybos procesus parametru optimizavimas gali būti atliktas panaudojant dirbtiniu intelektu pagrįstą mašininį mokymąsi. Šie metodai, veikdami kartu, gali rinkti lazerinio pjovimo proceso kokybės charakteristikų duomenis, o pastebėjus nukrypimus valdyti proceso parametrus, kad kokybė vėl būtų optimali [2, 3]. Vis dėlto, šiuo metu tokių pažangių įrankių integravimas į realią gamybos aplinką vis dar yra sudėtingas procesas, nes kuriant optimizavimo modelius, visų pirma, būtina gerai suprasti procesą bei žinoti kiekvieno proceso parametro įtaką detalių kokybei. Be to, metalo apdirbimo sektoriuje naudojami kelių tipų lazerinio pjovimo įrenginiai (pvz., CO₂ ar „fiber“), kurie skiriasi savo veikimo principu. Toks skirtumas sukelia sunkumų analizuojant lazerinio pjovimo kokybės charakteristikas, nes kokybės charakteristikų tyrimus būtina atlikti kiekvienam lazerio tipui atskirai. Vis dėlto, literatūros apžvalga rodo, kad tyrimų, atliktų naudojant „fiber“ tipo lazerius, yra kur kas mažiau, todėl galima teigti, kad šio tipo lazerių pjovimo kokybei reikalingi tolimesni tyrimai.

Tikslas – ištirti lazerinio pjovimo parametru įtaką „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei.

Uždaviniai:

1. atlikti pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimus;
2. įvertinti lazerinio pjovimo tikslumą;
3. įvertinti pjūvio geometrijos taisyklingumą;

4. įvertinti lazerio terminio poveikio zonos morfologiją;
5. sukurti dirbtiniais neuroniniais tinklais pagrįstą modelį lazerinio pjovimo kokybės charakteristikoms optimizuoti;
6. apibrėžti lazerinio pjovimo technologijų taikymo socio-ekonominius padarinius.

Hipotezė: tik tinkamai parinkti „fiber“ tipo lazerio pjovimo parametrai gali užtikrinti aukštą storesnių medžiagų pjovimo kokybę.

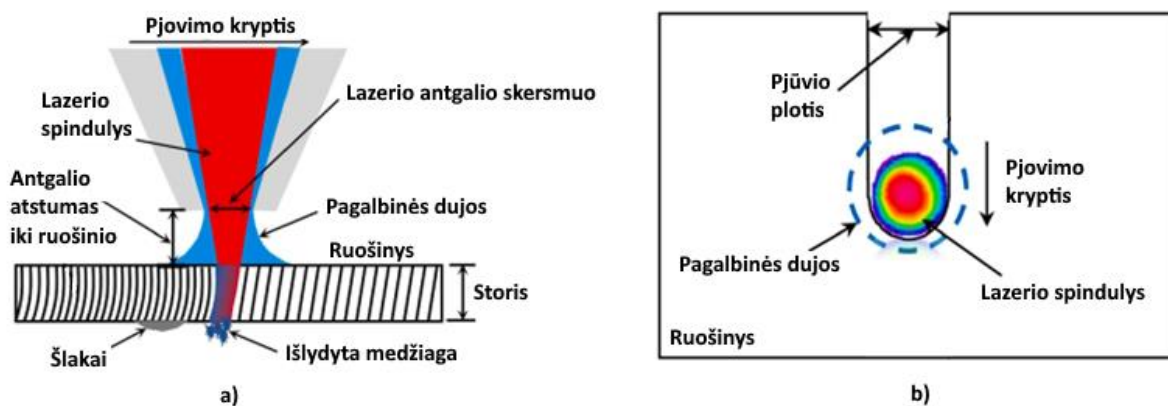
1. Lazerinio pjovimo procesas metalų apdirbimo pramonėje

Siekiant padidinti lazerinio pjovimo proceso efektyvumą svarbu apsibrėžti, pagal ką bus vertinamas procesas. Tam dažnai pasirenkamos gaminamų detalių kokybės charakteristikos, nuo kurių priklauso gaminių ilgaamžiškumas, patikimumas juos eksploatuojant. Be to, proceso tobulinimą būtina pradėti nuo įvairiapusės proceso analizės, nes tik suprantant įrenginio veikimo principą galima nustatyti, kur yra kokybės defektų priežastys ir kaip juos galima pašalinti siekiant aukštesnės kokybės.

1.1. Lazerio veikimo principas

Lazerinio pjovimo įrenginių veikimas yra pagrįstas skaitmeniniu programiniu valdymu (SPV), dar kitaip vadinamu CNC (angl. *computer numerical control*). CNC valdikliu galima nepertraukiamai valdyti lazerio pjovimo galvutę pagal iš anksto sudarytą pjovimo programą, kur numatoma lazerio judėjimo trajektorija, pagrindiniai pjovimo parametrai (pvz., pjovimo greitis, lazerio galia, pagalbinių dujų slėgis, fokusavimo atstumas ir kt.) [4]. Lakštiniam metalui pjauti skirti lazerinio pjovimo įrenginiai dažniausiai veikia 3-ijų ašių koordinatinių sistemose. X–Y ašys yra lygiagrečios apdirbamo ruošinio paviršiui ir apibrėžia judėjimo trajektorijos koordinates, o Z ašies, statmenos ruošinio paviršiui, koordinatė nurodo lazerio antgalio atstumą iki ruošinio [5].

Lazerinis pjovimas yra vienas iš netradicinių medžiagų apdirbimo būdų, kuris, priešingai nei tradiciniai apdirbimo metodai (pvz., tekinimas, frezavimas, gręžimas ir kt.), pasižymi bekontakčiu veikimu, kurio metu nereikia fizinio įrankio kontakto su ruošiniu. Lazerinio pjovimo veikimo principas pavaizduotas 1 paveiksle. Čia įrankio funkciją atlieka lazerio antgalis, kur didelės galios lazerio spindulys sufokusuojamas į vieną tašką, kurio skersmuo dažniausiai yra apie 0,2 mm. Šiame taške pjaunama medžiaga išlydoma ir pagalbinių dujomis pašalinama iš pjūvio zonos [4, 5].



1 pav. Lazerio veikimo principas: a) vaizdas iš šono; b) vaizdas iš viršaus [4]

Lazerinio pjovimo metu gali būti naudojamos inertinės (pvz., azotas ar argonas) arba deguonies pagalbinės pjovimo dujos. Dujų pasirinkimą lemia pjaunama medžiaga, jos storis bei siekiama pjūvio paviršiaus kokybė. Pjovimui naudojant inertines dujas medžiaga apsaugoma nuo oksidacijos, gaunama geresnė pjūvio paviršiaus kokybė, todėl po apdirbimo nereikalingos papildomos šlifavimo operacijos [5, 6]. Vis dėlto, inertinės pagalbinės dujos rekomenduojamos tik plonoms medžiagoms pjauti, nes didėjant medžiagos storiui didėja ir pjovimui reikalingas energijos kiekis. Tokiu atveju tam, kad būtų palengvintas storesnių medžiagų apdirbimas ir padidintas lazerinio pjovimo proceso efektyvumas, dažnai naudojamos deguonies pagalbinės dujos. Pjovimo metu vykstančios

egzoterminės oksidacijos reakcijos tarp deguonies ir pjaunamos medžiagos padidina temperatūrą pjūvio zonoje, todėl tampa lengviau išlydyti medžiagą [5, 7].

1.2. Lazerių tipai

Lazerinio pjovimo technologija metalo apdirbimo pramonėje pirmą kartą buvo panaudota 1967 metais, kai 300 W galios CO₂ tipo lazeriu buvo pabandyta apdirbti 1 mm storio plieno lakštą [8, 9]. Nuo šio pirmojo bandymo matoma akivaizdi pažanga lazerinio apdirbimo srityje – lazeriai kur kas galingesni, be to apdirbamojoje pramonėje naudojama daugiau lazerių tipų, kurie skirstomi pagal aktyviają terpę, kur sukuriamas lazerio spindulys. Pavyzdžiui, CO₂ tipo lazerio aktyvioji medžiaga yra anglies dioksido (CO₂), azoto (N₂) ir helio (He) dujų mišinys, o „fiber“ tipo lazerio – optinis pluoštas. CO₂ lazeriai pjovimui naudojami jau seniai, tačiau pastaruoju metu vis labiau populiarėja naujesnė „fiber“ tipo lazerių technologija [8]. Šių dviejų lazerių tipų charakteristikų palyginimas pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. Pagrindinių CO₂ ir „fiber“ lazerių charakteristikų palyginimas [8]

	CO ₂	„Fiber“
Lazerio šaltinis	Dujų mišinys	Optinis pluoštas
Spindulio perdavimas	Veidrodžių ir lęšių sistema	Optinis pluoštas, lęšiai
Bangos ilgis	10,6 μm	1,07 μm
Energijos panaudojimo efektyvumas	5–8 %	20–30 %
Galia	Iki 50 kW	Iki 50 kW
Aptarnavimo intervalas	Kas 2000 valandų	Kas 10 000 valandų
1 kW kaina	60 000 Eur	120 000–140 000 Eur
Įrenginio užimamas plotas	Didelis	Mažas

Svarbu paminėti, kad lazerio skleidžiamos bangos ilgis turi daug įtakos proceso efektyvumui. Trumpesnio bangos ilgio lazerio spindulį pjaunamai medžiagai lengviau sugerti, todėl „fiber“ tipo lazeriai dėl 10 kartų trumpesnio bangos ilgio pasižymi didesniu pjovimo efektyvumu, pagreičiu bei maksimaliu pasiekiamu pjovimo greičiu [4, 10]. Be to, trumpesnis bangos ilgis leidžia „fiber“ tipo lazeriu pjauti įvairias medžiagas, tokias kaip varis, nikelis ir jo lydiniai ar kompozitinės medžiagos [8]. Prie paminėtų „fiber“ tipo lazerių privalumų dar galima priskirti ir retą aptarnavimą, kuris leidžia sumažinti aptarnavimo išlaidas, įrenginio prastovų laiką. Nustatyta, kad „fiber“ tipo lazeriai gali būti gera alternatyva kitoms lakštinio metalo apdirbimo technologijoms, tokioms kaip koordinatinis štapavimas ar kirtimas giljotina. Dažnai lazerinis pjovimas yra netgi pranašesnis, nes dideliu pjovimo greičiu apdirbant plono metalo lakštą medžiagai sukeliama mažiau liekamųjų įtempčių nei mechaninio kirtimo metu. Be to, lazeriu galima išpjauti įvairius kontūrus be papildomų įrankių įsigijimo, kurie būtų būtini norint kontūrą iškirsti koordinatinio štapavimo būdu [10].

Kita vertus, pagrindiniai „fiber“ tipo lazerių trūkumai yra didelė jų įsigijimo kaina bei pjovimo kokybės sumažėjimas apdirbant storesnes medžiagas [8]. Svarbu paminėti, kad pjaunant daugiau nei 4 mm storio medžiagas, gaunama prastesnė pjūvio paviršiaus kokybė nei pjovimui naudojant CO₂ tipo lazerį [9]. Taigi, kiekvienas lazerio tipas turi tiek privalumų, tiek trūkumų, todėl renkantis lazerinio pjovimo įrenginį ir siekiant geriausios gaminių kokybės svarbu numatyti, kokio storio ir tipo medžiagų pjovimui jis bus naudojamas.

1.3. Tipinės lazerinio pjovimo kokybės problemos

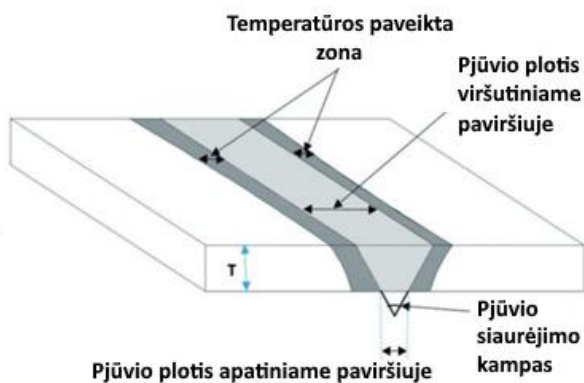
Nors lazerinis pjovimas turi daug aptartų privalumų, tačiau praktikoje vykdamas šį medžiagų apdirbimo procesą susiduriama ir su pjovimo kokybės problemomis. Pagrindinis jų šaltinis – aukšta temperatūra pjūvio zonoje, dėl kurios šalia pjūvio susidaro temperatūros paveikta zona (angl. *heat-affected zone* – *HAZ*). Kadangi lazerinio pjovimo metu medžiaga įkaista, o paskui greitai aušta, čia pastebimi lydinio kristalinės struktūros pokyčiai, mikro įtrūkimai, liekamieji įtempiai, didesnis kietumas lyginant su temperatūros nepaveikta ruošinio dalimi. Be to, matomas ir perlydytų temperatūros paveiktų lydinio sluoksnių trapumas bei cheminės sudėties pokyčiai dėl pjovimo metu vykstančių oksidacijos reakcijų su pagalbinėmis pjovimo dujomis [11, 12].

Dažnai lazerinio pjovimo metu ne visa išlydyta medžiaga pilnai pašalinama iš pjūvio zonos. Likusi išlydyta karšta medžiaga teka žemyn nuo viršutinio apatinio ruošinio paviršiaus link. Jei ši medžiaga atvėsta ir sukietėja pjūvio zonoje, pastebimi metalo šlakai, didesnis paviršiaus šiurkštumas (žr. 2 pav.) [9]. Kita vertus, jei išlydyta medžiaga per dideliu greičiu pašalinama iš pjūvio zonos, ruošinys aptaškomas išlydytu metalu, kuris sukietėja ir lieka apatiniame apdirbtos detalės paviršiuje [12].



2 pav. Paviršiaus šiurkštumas [13]

Dar viena svarbi lazerinio pjovimo kokybės charakteristika yra pjūvio plotis ir jo geometrija. Teigiama, kad kuo mažesnis pjūvio plotis, tuo geresnė apdirbimo kokybė bei matmenų tikslumas. Vis dėlto, nepaisant pjūvio pločio, itin svarbi ir pjūvio geometrija, nes po pjovimo dažnai gaunamas ne taisyklingas statmenas, o apatinio pjūvio paviršiaus link siaurėjantis (žr. 3 pav.) V formos pjūvis [14].



3 pav. Pjūvio kūgiškumas [14]

Svarbu paminėti, kad aptarti detalių kokybės defektai, atsiradę lazerinio pjovimo metu, gali turėti įtakos detalių eksploatacijai ir ilgaamžiškumui. Be to, dažnai lazerinis pjovimas nėra paskutinė

detalės apdirbimo operacija. Po pjovimo įprastai yra atliekamos formavimo, sujungimo (pvz., suvirinimas, kniedijimas ir kt.), dengimo įvairiomis dangomis operacijos. Dėl šios priežasties detalės lazerinio apdirbimo kokybė itin svarbi, nes paviršiaus defektai gali turėti įtakos kitų operacijų atlikimui ir galutinio gaminio tikslumui bei kokybei. Pavyzdžiui, suvirinimo metu dėl nelygios pjovimo briaunos, gali būti apsunkintas detalės pozicionavimas, taip pat gali sumažėti suvirinto mazgo matmenų tikslumas. Atliekant galutines technologines operacijas, tokias kaip dažymas ar galvanizavimas, pjovimo briaunų paviršių kokybė taip pat svarbi, nes nuo jos tiesiogiai priklauso dangos sukibimas [15, 16]. Be to, didelį paviršiaus šiurkštumą ar metalo šlakus dažai ne visada paslepia, todėl jie lieka matomi ir lemia galutinį gaminio estetinį vaizdą. Norint to išvengti prieš dažymą dažnai atliekamos papildomas paviršių apdirbimo operacijos (pvz., šlifavimas), tačiau tai didina darbo sąnaudas bei gaminio savikainą [8]. Taigi, dėl nepakankamo dėmesio paviršiaus kokybei lazerinio pjovimo proceso metu atliekant kitas technologines operacijas gali kilti kur kas rimtesnių gaminio kokybės problemų [16]. Vis dėlto, pjūvio paviršiaus kokybė yra ne vienintelė svarbi kokybės charakteristika. Smulkios lazeriu pjautos detalės dažnai yra kur kas didesnių ir sudėtingesnių mazgų, kurie naudojami aviacijos, kosmoso ar automobilių pramonėje, komponentai. Šiose srityse keliami ypač dideli saugumo ir patikimumo reikalavimai, todėl didelę svarbą įgyja po lazerinio apdirbimo proceso pakitusios detalių mechaninės savybės, pavyzdžiui, pjūvio zonos kietumas ar liekamieji įtempiai [4].

Taigi, nepakankama detalių kokybę gali lemti ne tik tokių sudėtingų sistemų funkcionalumą ir sklandų veikimą, bet ir saugumą [15]. Dėl šios priežasties siekiant įgyvendinti visus saugumo ir eksploatacinius reikalavimus kiekvieno gamintojo pareiga yra ne tik lazeriu išpjauti detalę, tačiau ir užtikrinti, kad ji atitiktų standarto ISO 9013:2017 [17] keliamus reikalavimus, kurie apibrėžia terminiu pjovimu gaminamų detalių kokybės charakteristikas.

1.4. Lazerinio pjovimo kokybės defektų priežastys

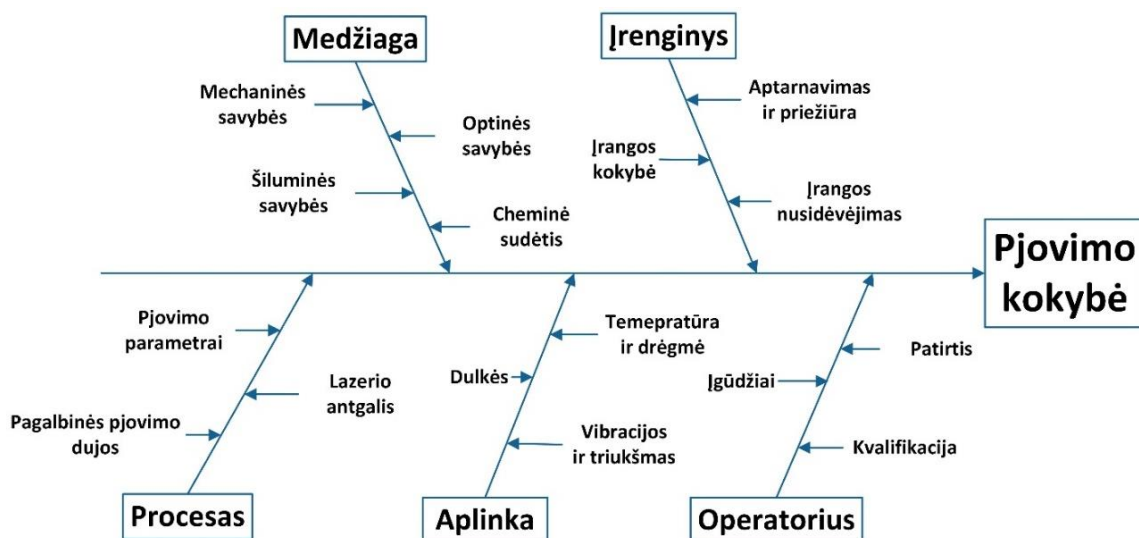
Siekiant išspręsti lazerinio pjovimo kokybės problemas svarbu suprasti jų priežastis. Tam gali būti naudojama priežasties ir pasekmės diagrama, kitaip vadinama Ishikawa diagrama. Kaip pavaizduota 4 paveiksle, lazerinio pjovimo kokybę lemiančius veiksnius galima išskaidyti į 5 pagrindines sritis: medžiaga, įrenginys, procesas, aplinka ir operatorius.

Analizuojant įrenginio įtaką pjovimo kokybei galima išskirti naudojamos įrangos būklę. Jeigu įrangai pagal gamintojo operacijas neatliekami numatyti planiniai aptarnavimai, pjovimo kokybė mažėja. Dėl šios priežasties norint išlaikyti tinkamą kokybės lygį svarbu teisingai ir laiku prižiūrėti įrenginį. Be to, aptarnavimo metu keičiamos pagrindinės lazerio detalės, reikalingos pjovimui (pvz., lazerio spindulio fokusavimo lęšiai, lazerio antgalis ir kt.), todėl svarbu, kad šios detalės būtų kokybiškos ir tiktų naudojami lazerinio pjovimo įrangai [18].

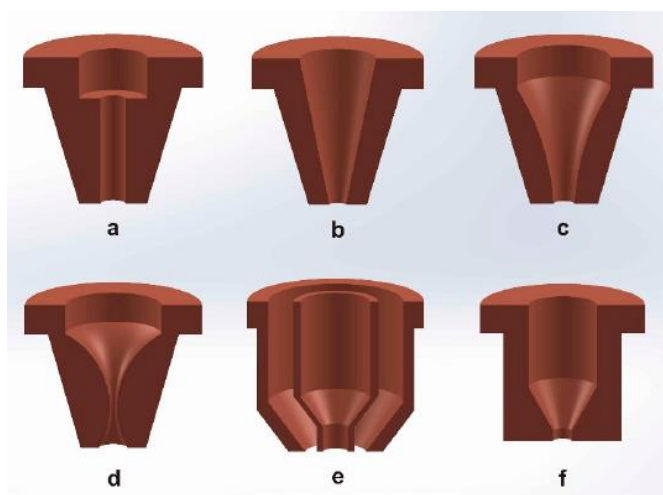
Be įrenginio svarbus ir procesas, kuriam didžiausią įtaką turi pagalbinių pjovimo dujų tipas bei parinkti pjovimo parametrai: lazerio galia, pjovimo greitis, pagalbinių dujų slėgis, lazerio spindulio fokusavimo atstumas, lazerio atstumas iki ruošinio. Lazerio antgalis (angl. *nozzle*) taip pat yra svarbi lazerinio pjovimo įrenginio dalis, nuo kurios priklauso procesas. Pjaunant įvairias skirtingų storių medžiagas būtina pasirinkti tinkamą lazerio antgalį pagal jo konstrukciją bei skersmenį.

Lazerio antgalio konstrukcija tiesiogiai lemia pagalbinių dujų greitį, statinį dujų slėgį, nuo kurių priklauso ir pjovimo kokybė. Skirtingos geometrinės formos lazerio antgaliai pavaizduoti 5 paveiksle.

Nustatyta, kad lazerinio pjovimo procesui naudojant kūginius lazerio antgalius (5 pav. b, c) pasiekiamas didesnis proceso efektyvumas nei pjaunant kitų formų antgaliais [9].



4 pav. Lazerinio pjovimo kokybę lemiantys veiksniai



5 pav. Skirtingos konstrukcijos lazerio antgaliai [9]

Lazerio antgaliai dar gali būti skirstomi pagal sluoksnių skaičių į dvi pagrindines grupes: vieno sluoksnio ir dviejų sluoksnių (5 pav. e). Antgalio sluoksnių skaičius priklauso nuo naudojamų pagalbinių dujų. Pavyzdžiui, vieno sluoksnio antgaliai rekomenduojami, kai naudojamos azoto pagalbinės dujos, o dviejų sluoksnių antgaliai tinka medžiagas pjaunant su deguonies pagalbinėmis dujomis, nes tokio proceso metu vykstančios egzoterminės oksidacijos reakcijos tarp dujų ir medžiagos papildomai įkaitina ir lazerio antgalį. Kita vertus, svarbus ir antgalio skersmuo, nuo kurio priklauso į pjūvio zoną patenkančio dujų srauto debitas. Plonų medžiagų (iki 3 mm storio) pjovimui rekomenduojami $\varnothing 1$ mm antgaliai, o storesnėms nei 3 mm medžiagoms – $\varnothing 1,5$ mm lazerio antgaliai. Jeigu norima pjauti medžiagą, storesnę nei 10 mm, tada patartina rinktis $\varnothing 2$ mm ar didesnio skersmens antgalį [19].

Kita vertus, lazerinio pjovimo kokybės defektų atsiradimui įtakos turi ir pjaunama medžiaga. Kiekviena medžiaga pasižymi skirtingomis mechaninėmis savybėmis, chemine sudėtimi. Vis dėlto, teigiama, kad medžiagos optinės ir šiluminės savybės turi daugiau įtakos lazerinio apdirbimo metu

nei mechaninės. Remiantis 2 lentelėje pateiktais duomenimis galima teigti, kad plienas pasižymi mažesniu šiluminiu laidumu nei aliuminis ar varis, todėl jį lengviau apdirbti [4, 7].

2 lentelė. Įvairių medžiagų šiluminės savybės [20]

Medžiaga	Šiluminis laidumas, W/m·K	Lydomosi temperatūra, °C	Savitoji šiluma, J/kg·K
Aliuminis	222	660	900
Plienas	15–52	1371–1532	448–502
Varis	393	1082	385
Nikelis	92	1453	440
Auksas	317	1063	129
Sidabras	429	961	235

Analizuojant aliuminio pjovimo procesą galima pastebėti, kad aliuminis taip pat pasižymi savybe atspindėti šviesą. Dėl šios priežasties pjovimo metu dalis medžiagai tenkančios lazerio spindulio energijos yra atspindima, todėl sunkiau apdirbti šią medžiagą. Didelis medžiagos šiluminis laidumas daro neigiamą įtaką jos apdirbimo kokybei, nes dėl didelio pjovimo metu sugerto šilumos kiekio didėja ir temperatūros paveiktos zonos dydis. Be to, sumažėjęs energijos kiekis, tenkantis pjovimui, skatina aliuminio oksidų susidarymą, kurie didina metalo klampumą, dėl kurio išlydytą medžiagą sunkiau pašalinti iš pjūvio zonos. Dėl šios priežasties po pjovimo gaunamas didesnis pjūvio šiurkštumas [4]. Norint išvengti tokių kokybės problemų rekomenduojama padidinti lazerinio pjovimo galią. Kita vertus, padidinta galia gali lemti ir didesnes energijos sąnaudas, spartesnį įrenginio detalių nusidėvėjimą bei dažnesnį įrenginio aptarnavimą [7]. Taigi, galima daryti išvadą, kad medžiagų savybės, ypač šiluminės ir optinės, turi didelę įtaką jų apdirbamumui.

Dar vienas veiksnys, nuo kurio gali priklausyti lazerinio pjovimo kokybė, yra aplinka, kurioje veikia įrenginys. Lazerinio pjovimo įrangą rekomenduojama eksploatuoti uždaroje patalpose, apsaugotose nuo atmosferos veiksnių (pvz., lietus, rūkas ir kt.), taip pat norint užtikrinti stabilų įrenginio veikimą patalpos grindys turi būti lygios. Be to, rekomenduojama patalpos temperatūra yra nuo 15 °C iki 35 °C, o santykinis oro drėgnumas nuo 20 % iki 75 %. Įrenginio darbui įtakos gali turėti dulkės, kurios gali paspartinti įrenginio detalių nusidėvėjimą, ir magnetiniai laukai, atsiradę dėl kitų netoli naudojamų elektros prietaisų, gali sukelti įrenginio veikimo sutrikimų [18]. Vadinasi, siekiant aukštos detalių kokybės svarbu laikytis įrenginių gamintojų pateikiamų rekomendacijų dėl aplinkos sąlygų. Galiausiai, lazerinio pjovimo kokybę gali lemti ir įrenginio operatoriaus patirtis bei įgūdžiai. Dėl šios priežasties svarbu, kad darbuotojas, valdantis įrenginį, turėtų reikalingą kvalifikaciją, suprastų technologinį procesą.

Apibendrinant galima teigti, kad lazerinis pjovimas yra sudėtingas procesas, kurio kokybei įtakos turi daug skirtingų veiksnių, pradedant nuo technologinės įrangos iki aplinkos sąlygų ar operatoriaus įgūdžių. Vis dėlto, teisingas proceso parametrų parinkimas gali užtikrinti proceso efektyvumą, tačiau norint tinkamai valdyti procesą reikia žinoti kiekvieno parametro įtaką pjūvio kokybės charakteristikoms.

1.5. Lazerinio pjovimo kokybės tyrimai

Šiuo metu atliekami įvairūs tyrimai, kuriais siekiama geriau išsiaiškinti lazerinio pjovimo procesą bei pagerinti proceso efektyvumą. Pavyzdžiui, Sołtysiak‘as ir kt. [8] atliko tyrimą, kurio metu lygino CO₂ ir „fiber“ tipo lazerių pjovimo tikslumą. Bandymams buvo naudojami 6 mm storio plieno S235JR

bandiniai, apdirbti abiejų nagrinėtų tipų lazeriais. Šie lazeriai veikia skirtingai, todėl tam, kad apdirbimas būtų atliktas vienodomis sąlygomis, pagrindiniai pjovimo parametrai (lazerio galia, pagalbinių dujų slėgis, pjovimo greitis) buvo parinkti taip, kad linijinės energijos kiekis būtų lygus 55,4 kJ/m. Bandinių matmenys, gauti po pjovimo, buvo lyginami su jų nominaliomis vertėmis įvertinant tolerancijas pagal PN EN 22768-fH standartą. Iš 25 analizuotų matmenų matavimų, atliktų matuojant bandinius, išpjautus CO₂ tipo lazeriu, 11 matavimo rezultatų nepateko į leistinas tolerancijos ribas. Priešingai, „fiber“ tipo lazeriu išpjauti bandiniai buvo kur kas tikslesni, nes tik 5 matmenų vertės neatitiko keliamų reikalavimų [8]. Taigi, akivaizdu, kad pjaunant „fiber“ tipo lazeriu gaunami tikslesni matmenys nei apdirbimui naudojant CO₂ tipo lazerį.

Liu ir kt. [21] atliko 25 mm storio plieno C45 pjovimo bandymus naudodami didelės galios (12 kW) „fiber“ tipo lazerį. Autoriai siekė nustatyti lazerio pjovimo greičio, pagalbinių deguonies dujų slėgio, lazerio antgalio atstumo iki ruošinio, lazerio spindulio fokusavimo atstumo įtaką pjūvio kūgiškumui. Šis parametras buvo įvertintas matuojant pjūvio plotį bandinio apatiniame ir viršutiniame paviršiuose. Vėliau, remiantis gautais rezultatais, buvo apskaičiuotas pjūvio siaurėjimo ar plėtėjimo kampas. Atlikus kiekvieno iš nagrinėtų parametru įtakos vertinimą nustatyta, kad pjūvio kūgiškumą labiausiai lemia pjovimo greitis, kuriam didėjant didėja ir kūgiškumas. Kiti autorių analizuoti pjovimo parametrai (pagalbinių dujų slėgis, fokusavimo atstumas, lazerio spindulio atstumas iki ruošinio) neturėjo reikšmingos įtakos pjūvio geometrijai [21]. Panašų tyrimą taip pat atliko autoriai Genna ir kt. [22], kurie nagrinėjo medžiagos, jos storio, pjovimo greičio, pagalbinio dujų slėgio ryšį su lazerio pjūvio briaunų kokybe. Priešingai nei anksčiau aptartas tyrimas, šiuo atveju keičiant pjovimo parametrus bandiniai buvo išpjauti 5 kW galios CO₂ tipo lazeriu, o bandymams buvo naudojamos įvairios medžiagos: mažo anglingumo plienas S235JR, nerūdijantis plienas AISI 304 ir aliuminio lydinys AlMg₃. Analizuojant medžiagos storio įtaką buvo nustatytas dėsningumas, kad didėjant storiui didėja ir lazerio pjūvio plotis, nes pjovimo metu reikia pašalinti didesnę medžiagos kiekį. Vertinant pjūvio kūgiškumą pastebėta, kad dažniausiai gaunamas V formos arba statmenas pjūvis, tačiau kai kuriais atvejais pjūvis plėtėjo apatinio pjūvio paviršiaus link, o šiuos skirtumus labiausiai lėmė medžiagos pasirinkimas [22]. Taigi, pjūvio geometriją lemia keletas veiksnių, tokių kaip pjovimo parametrai, medžiaga, jos storis, todėl norint gerinti lazerinio pjovimo kokybę svarbu atsižvelgti į bandymų rezultatus ir teisingai paruošti procesą.

Tyrimus taip pat atliko Boujelbene ir kt. [23], kurie analizavo terminį poveikį lydiniams lazerinio pjovimo metu. Autoriai bandymams naudojo CO₂ tipo lazerį, kuriuo keisdami pjovimo parametrus (lazerio galią ir pjovimo greitį) apdirbo 6 mm storio C45 plieno bandinius. Tam, kad būtų nustatyta šių parametru įtaką pjovimo kokybei, buvo atlikta bandinių mikroskopinė analizė, kurios metu pjūvio zonoje, lyginant ją su temperatūros nepaveikta bandinio zona, buvo pastebėti lydinio mikro struktūros pokyčiai. Siekiant įvertinti terminės žalos dydį matuotas kietumas 10 μm ir 210 μm atstumu nuo lazerio pjūvio vietos. Matavimai parodė, kad kietumas padidėjo 5–17 HV pagal Vickerso skalę priklausomai nuo parinktų pjovimo parametru. Be kietumo bandymų, taip pat buvo išmatuotas temperatūros paveiktos zonos plotis, kuris kito nuo 127 μm iki 232 μm. Taigi, remiantis gautais rezultatais daroma išvada, kad pjovimo greitis ir lazerio galia yra kritiniai parametrai, nuo kurių priklauso terminio poveikio pjaunamai medžiagai dydis. Pavyzdžiui, didinant pjovimo greitį mažėja terminio poveikio zonos storis ir pastebimas mažesnis kietumo pokytis. Kita vertus, didinant lazerio galią terminio poveikio zona ir kietumas didėja [23]. Panašų tyrimą atliko ir Covusoglu [24], kuris tyrė terminį poveikį 2024-T3 aliuminio lydiniiui. Pjovimo bandymai atlikti keičiant CO₂ tipo lazerio galią bei pjovimo greitį. Terminio poveikio zonos pločio matavimai patvirtina, kad didžiausia terminė

žala gaunama padidinus lazerio galią ar sumažinus pjovimo greitį. Be to, teigiama, kad iš šių dviejų parametru didesnę įtaką kokybei turi lazerio galia [24].

Amaral'as ir kt. [25] taip pat tyrė lazerinio pjovimo paviršiaus kokybę ir atliko „fiber“ tipo lazeriu išpjautų 2 mm storio bandinių kokybės parametru (paviršiaus šiurkštumo, metalo šlakų susidarymo) tyrimą. Bandydams buvo naudojamos dvi skirtingos medžiagos – nerūdijantis plienas AISI 316L ir mažo anglingumo plienas DC01. Siekiant nustatyti ryšį tarp pasirinktų kokybės charakteristikų ir lazerinio pjovimo proceso parametru šios medžiagos buvo apdirbtos keičiant lazerio galią, pjovimo greitį, pagalbinių dujų slėgį. Pradinės šių parametru vertės buvo parinktos remiantis lazerinio pjovimo įrenginio gamintojo rekomendacijomis, o vėliau vertės buvo didinamos bei mažinamos. Visų pirma, buvo atlikta bandinių mikro struktūros analizė, kurios metu kritinių lydinio kristalinės struktūros pokyčių nebuvo pastebėta, nes buvo pjaunamos plonos medžiagos, todėl pjūvio zona nebuvo ilgą laiką veikama aukštos temperatūros, kuri sukelia metalo lydinio struktūrinius pokyčius. Kita vertus, bandinių šiurkštumo matavimai parodė, kad plieno DC01 bandiniai pasižymi didesniu paviršiaus šiurkštumu lyginant su nerūdijančio plieno AISI 316L bandiniais, nes šie yra kietesni. Vis dėlto, kalbant apie pjovimo parametru įtaką šiurkštumui, nustatyta, kad kuo didesnis pjovimo greitis ir lazerio galia, tuo mažesnis pjūvio paviršiaus šiurkštumas ir geresnė kokybė. Dar viena autorių nagrinėta kokybės charakteristika buvo metalo šlakų susidarymas, iš kurios galima spręsti, ar išlydyta medžiaga tinkamai pašalinama iš pjūvio zonos. Atlikus bandinių analizę buvo pastebėta, kad geresnė pjūvio kokybė su mažiau šlakų gaunama naudojant mažesnę lazerio galią ir didesnę pjovimo greitį. Svarbu paminėti ir dar vieną analizuotą parametru – pagalbinių pjovimo dujų slėgį, kuris paviršiaus šiurkštumui reikšmingos įtakos neturėjo, tačiau tiriant šlakų susidarymą buvo itin svarbus, nes sumažinus pagalbinių dujų slėgį išlydytą medžiagą tampa sunkiau pašalinti iš pjūvio zonos ir dėl to gaunama prastesnė detalių kokybė [25]. Taigi, autorių atlikto tyrimo rezultatai įrodo, kad pjovimo metu gamintojų rekomenduojamos pjovimo parametru vertės ne visada garantuoja geriausią kokybę, todėl norint pagerinti proceso efektyvumą svarbu analizuoti gaunamus rezultatus ir įvesti pjovimo parametru korekcijas.

Literatūros apžvalga rodo, kad vykdant lazerinio pjovimo procesą susiduriama su detalių kokybės defektais. Be to, skirtingi proceso parametrai turi įtakos skirtingoms kokybės charakteristikoms. Tai reiškia, kad, pavyzdžiui, sumažinus lazerio galią gaunamas mažesnis paviršiaus šiurkštumas, tačiau išauga šlakų susidarymo tikimybė. Dėl šios priežasties svarbu nustatyti pagrindinių pjovimo parametru vertes, kurioms esant būtų gautos optimalios kokybės charakteristikos. Be to, galima teigti, kad lazerinio pjovimo kokybės tyrimų, atliktų naudojant „fiber“ tipo lazerį, yra kur kas mažiau nei CO₂, todėl šiam lazerio tipui reikalingi tolimesni tyrimai.

1.6. Skyriaus apibendrinimas

Lazerinis pjovimas yra pažangus įvairių medžiagų apdirbimo būdas. Vis dėlto, tai yra sudėtingas procesas, nes jo efektyvumą bei pjovimo kokybę lemia daug skirtingų veiksnių, tačiau svarbiausias – proceso parametru parinkimas. Kaip buvo minėta, „fiber“ tipo lazeriai yra naujesnė lazerių technologija, kuri yra geriausias pasirinkimas plonomis medžiagoms apdirbti. Visgi, dažnai norima turimą įrangą panaudoti kuo universaliau, todėl „fiber“ tipo lazeriais bandoma pjauti ir storesnes medžiagas. Tokio pjovimo metu susiduriama su prastesne detalių kokybe, o norint ją pagerinti būtina tinkamai parinkti pagrindinius pjovimo parametrus. Kadangi „fiber“ lazeriai šiuo metu vis plačiau naudojami metalo apdirbimo sektoriuje, šiam lazerių tipui reikalingi tolimesni tyrimai analizuojant pjovimo parametru įtaką storesnių medžiagų apdirbimo kokybei.

2. Lazerinio pjovimo kokybės tyrimo metodika

Pagrindinis baigiamojo projekto tikslas yra ištirti lazerinio pjovimo parametrų įtaką „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei. Tam, kad būtų pasiektas iškeltas tikslas, reikalingi 5 etapai:

- 1) Bandinių pjovimas;
- 2) Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas;
- 3) Matmenų ir pjūvio geometrijos tikslumo įvertinimas;
- 4) Lazerio terminio poveikio metalo lydiniui nustatymas;
- 5) Tyrimų rezultatų analizė bei lazerinio pjovimo kokybės optimizavimas naudojant dirbtiniu intelektu pagrįstą modelį.

2.1. Bandinių pjovimas

Pjovimo bandymams naudojami 4 ir 6 mm storio karštai valcuoti plieno S355JR (EN 1.0045) lakštai. Tai yra nelegiruotas konstrukcinis plienas, kuris dėl savo cheminės sudėties (žr. 3 lentelę) ir mechaninių savybių (žr. 4 lentelę) gali būti naudojamas detalėms, kurias veiks įvairios apkrovos, gaminti. Be to, plienas S355JR pasižymi geru suvirinamumu, todėl gali būti suvirintas įvairiais būdais [26].

3 lentelė. Plieno S355JR cheminė sudėtis [27]

Plienas	Cheminių elementų kiekis (masės dalis), %				
	Anglis	Manganas	Fosforas	Siera	Silicis
S355JR	0,23	iki 1,6	iki 0,05	iki 0,05	iki 0,05

4 lentelė. Plieno S355JR mechaninės savybės [26, 27]

Plienas	Stiprumo riba σ_u , MPa	Takumo riba σ_y , MPa	Kietumas, HB	Tankis, kg/m ³
S355JR	470–630	355	146–187	7850

Kadangi numatyta analizuoti „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybę, bandinių pjovimui pasirenkamas 4 kW galios gamintojo *Prima Power* „fiber“ tipo lazerinio pjovimo įrenginys *Platino Fiber 1530* (žr. 6 pav.), kurio techninės specifikacijos pateiktos 5 lentelėje.

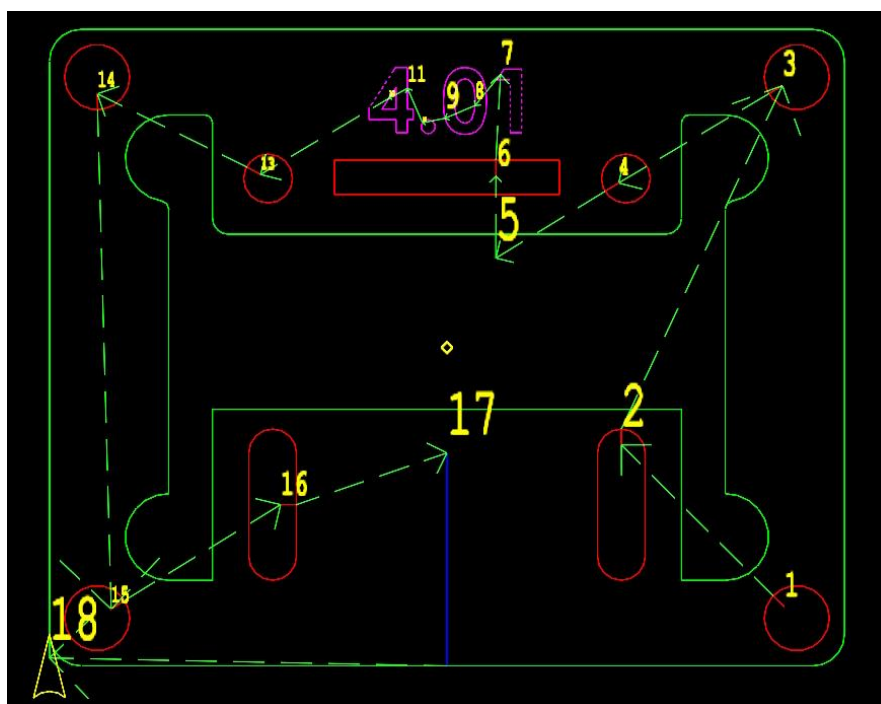


6 pav. Lazerinio pjovimo įrenginys *Platino Fiber 1530* [28]

5 lentelė. Platino Fiber 1530 techninės specifikacijos [28]

Maksimalios pastūmos	X ašis – 3,048 mm Y ašis – 1,524 mm Z ašis – 150 mm
Maksimalus pjovimo greitis	100 m/min
Maksimalūs pjaunamo lakšto matmenys	1500 × 3000 mm
Galia	4 kW
Pjovimo tikslumas	0,03 mm
Galimos pagalbinės dujos ir jų maksimalus jų slėgis	Azotas (30 bar) Deguonis (16 bar)
Įrenginio matmenys	10500 × 3400 × 2200 mm
Įrenginio masė	10 000 kg

Bandinių geometrinė forma pasirenkama atsižvelgiant į tipines lazeriniu pjovimo būdu pjaunamas detales, kurių apdirbimą sudaro išorinio kontūro bei įvairių vidinio kontūro elementų, pavyzdžiui, skylių ar išpjovų, pjovimas. 7 paveiksle pavaizduotas lazerio pjovimo kelias, kur skaičiais pažymėti bandinio pjovimo etapai. Galima pastebėti, kad pjovimas pradedamas nuo vidinio kontūro elementų (1–6 ir 13–16 etapai) bei bandymo numerio graviravimo (7–12 etapai), galiausiai išpjaunamas bandinio išorinis kontūras (18 etapas).



7 pav. Lazerio pjovimo kelias bandiniui apdirbti

Pjovimo metu apdirbamas plieno lakštas padedamas ant įrenginio stalo, o lazerio spindulys nukreipiamas į pjaunamą medžiagą (žr. 8 pav.). Išpjovus kiekvieną bandinį įrenginio CNC valdiklyje keičiami pagrindiniai lazerinio pjovimo parametrai – lazerio galia, pjovimo greitis ir pagalbinių dujų slėgis. Kitų parametru vertės (fokusavimo atstumas, lazerio antgalio atstumas iki ruošinio ir kt.) lieka pastovios.



8 pav. Lazerinio pjovimo procesas

Įrenginio galimybės leidžia bandinius apdirbti naudojant tiek azoto, tiek deguonies pagalbinės dujas, tačiau atsižvelgiant į tai, kad pjaunamas didesnio storio plieno lakštas, pjovimui naudojamos deguonies pagalbinės dujos. Kaip buvo minėta, procesui svarbus ir naudojamas lazerio antgalis. 4 ir 6 mm storio plieno lakšto pjovimo bandymams naudojamas kūginės formos lazerio antgalis (žr. 9 pav.), kurio skersmuo Ø1,5 mm.



9 pav. Lazerio antgalis

Parinkti skirtingi pjovimo parametrai turi tiesioginės įtakos linijinės energijos kiekiui, tenkančiam pjūvio zonai. Linijinė energija apskaičiuojama pagal (1) formulę [29]:

$$E_l = \frac{P \cdot t}{L}; \quad (1)$$

čia E_l – linijinė energija, J/mm; P – lazerio galia, W; t – apdirbimo laikas, s; L – lazerio pjovimo kelias, mm.

Apdirbimo laikas t apskaičiuojamas:

$$t = \frac{60 \cdot L}{v}; \quad (2)$$

čia v – pjovimo greitis, mm/min.

(2) formulę įstačius į (1) formulę gaunama supaprastinta linijinės energijos skaičiavimo (3) formulė:

$$E_l = \frac{60 \cdot P}{v}; \quad (3)$$

Siekiant įvertinti lazerinio pjovimo parametrų įtaką pjovimo kokybei skirtingais pjovimo parametrais atliekami išpjautų bandinių kokybės charakteristikų matavimai.

2.2. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas

Remiantis ISO 4287:1997 standartu [30] matuojamas skirtingais pjovimo parametrais išpjautų bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumas. Matavimai atliekami naudojant *Mitutoyo SJ-210* šiurkštomatį, pavaizduotą 10 paveiksle. Matavimams pasirinktas matavimo greitis lygus 0,5 mm/s, o matavimo atstumas $l_n=12,5$ mm. Šis atstumas dalinamas į 5 lygius intervalus, kurių ilgis $l_r=2,5$ mm.



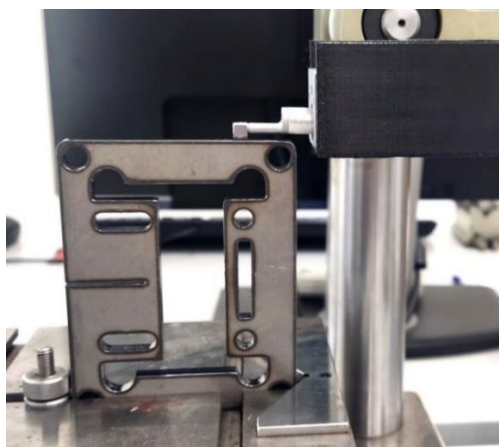
10 pav. Šiurkštomatis *Mitutoyo SJ-210*

Pjūvio paviršiaus šiurkštumo įvertinimui gali būti naudojami įvairūs šiurkštumo parametrai. Atliekant lazeriu išpjautų bandinių šiurkštumo matavimą pasirenkamos šios šiurkštumo charakteristikos:

- vidutinis paviršiaus šiurkštumas R_a , kuris parodo vidutinį skirtumą tarp aukščiausių matuojamo profilio viršūnių ir giliausių įdubų taškų;
- vidutinis šiurkštumo gylis R_z , gaunamas apskaičiuojant l_r ilgio intervaluose gautų 5 didžiausių profilio viršūnių ir įdubų taškų skirtumų vidurkį;
- maksimalus šiurkštumo gylis R_{z1max} – didžiausias skirtumas tarp profilio viršūnių ir įdubų taškų visame matuojamame bandinio ilgyje l_n [30].

Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimui bandinys įtvirtinamas taip, kad matuojamas paviršius būtų viršuje. Tuomet specialus šiurkštomačio antgalis nustatomas virš matuojamo paviršiaus (žr. 11 pav.)

ir pradedamas matavimas. Po matavimo prietaiso ekrane matomi paviršiaus šiurkštumo charakteristikų matavimo rezultatai.

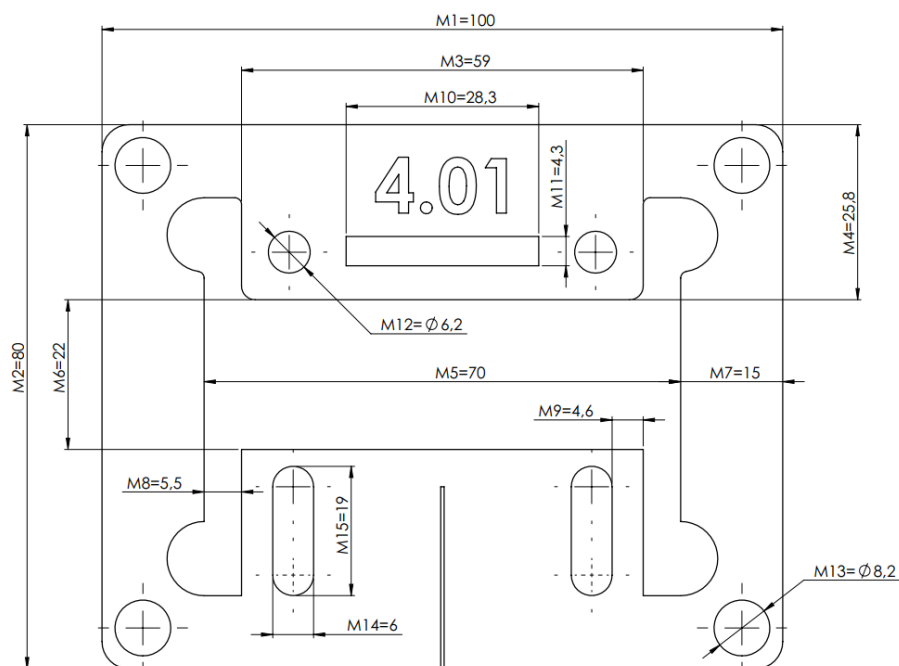


11 pav. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas

Kiekvieno bandinio pjūvio paviršiaus šiurkštumas išmatuojamas du kartus, ilgesnėje ir trumpesnėje kraštinėse, o vėliau apskaičiuojami šiurkštumo parametrai R_a , R_z bei $Rz1max$ vidurkiai kiekvienam bandiniui.

2.3. Matmenų ir pjūvio geometrijos tikslumo matavimas

Lazerinio pjovimo kokybę galima įvertinti analizuojant matmenų tikslumą. Lyginant matmenų vertes su prieš pjovimą nustatytais nominaliais matmenimis skaičiuojama matmenų nuokrypa, kuri lyginama su standarte ISO 9013:2017 nurodytomis detalių, gaminamų terminio pjovimo būdais (pvz., lazerinis pjovimas, plazminis pjovimas ir kt.), matmenų tolerancijų vertėmis. Bandinių tikslumui įvertinti matuojama 15 matmenų, nurodytų 12 paveiksle.



12 pav. Bandinio eskizas matmenų tikslumui matuoti

Kadangi lazerio pjūvis dažnai nėra statmenas, pasirinkti matmenys matuojami tiek viršutiniame, tiek apatiniame bandinio paviršiuose. Naudojant šiuos rezultatus apskaičiuojamas pjūvio kūgiškumas, kuris apibūdina kiekvieno matuojamo matmens skirtumą skirtinguose bandinio paviršiuose. Pjūvio kūgiškumo kampas apskaičiuojamas pagal (4) formulę [31]:

$$\alpha = \left(\frac{VP - AP}{2 \cdot t} \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (4)$$

čia α – pjūvio kūgiškumo kampas, °; VP – matmens vertė viršutiniame bandinio paviršiuje, mm; AP – matmens vertė apatiniame bandinio paviršiuje, mm; t – bandinio storis, mm.

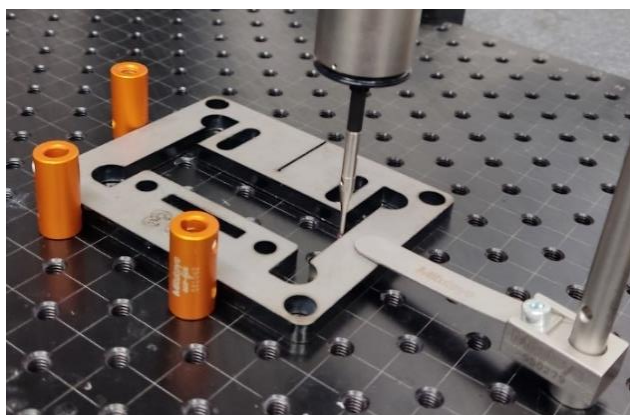
Pagal gautą kampo vertę įvertinama pjūvio kūgiškumo kryptis. Jei kampas teigiamas, tuomet pjūvis siaurėja nuo viršutinio link apatinio paviršiaus. Priešingai, jei vertė neigiama – pjūvis plėtėja apatinio paviršiaus link.

Apibrėžtiems matmenims matuoti naudojama *Mitutoyo CRYSTA-Apex 9106* koordinatinė matavimo mašina (žr. 13 pav.), kurios matavimo tikslumas 0,002 μm [32].



13 pav. Koordinatinė matavimo mašina *Mitutoyo CRYSTA-Apex 9106* [32]

Matavimo metu bandinys padedamas ant matavimo plytos, o jo įtvirtinimui naudojamos trys atramos bei prispaudėjas (žr. 14 pav.). Matavimai atliekami patalpoje palaikant pastovią 20 °C temperatūrą.

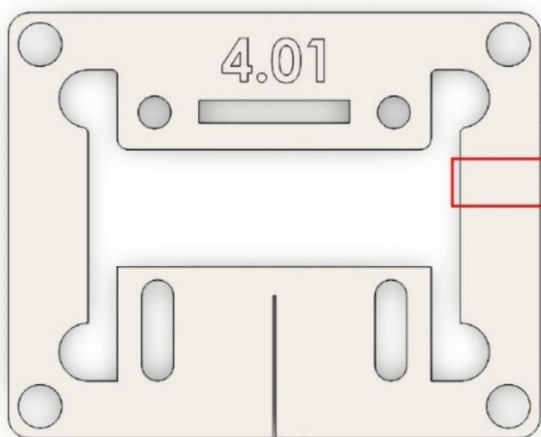


14 pav. Matmenų tikslumo matavimas

Matmenų matavimo procesui palengvinti sukuriamos dvi matavimo programos, skirtos pamatuoti pasirinktus matmenis bandinio viršutiniame bei apatiniame paviršiuose, todėl kiekvieno bandinio matavimas atliekamas po du kartus naudojant skirtingas programas.

2.4. Lazero terminio poveikio tyrimas

Norint ištirti lazerinio pjovimo metu medžiagą veikiančios temperatūros poveikį metalo lydiniui atrenkama po tris 4 ir 6 mm storio bandinius, kurie pasižymėjo gera, vidutine bei žema pjovimo kokybe. Terminiam poveikiui metalo lydiniui įvertinti iš šių bandinių išpjaunami mažesni ruošiniai, kurie toliau naudojami mikrošlifams gaminti. Bandinio išpjovimo vieta terminiam poveikiui tirti pavaizduota 15 paveiksle.



15 pav. Terminio poveikio tyrimo bandinio išpjovimo vieta

Išpjautas ruošinys įliejamas į epoksidinę dervą. Vėliau naudojant *LAM PLAN SMARTLAM 2.0* šlifavimo įrenginį (žr. 16 pav.) paruošiamas mikrošlifo paviršius. Šlifavimui į laikiklį įtvirtinama po 3 ruošinius (žr. 17 pav.), kurie šlifavimo metu sukasi 300 aps/min greičiu (žr. 18 pav.).

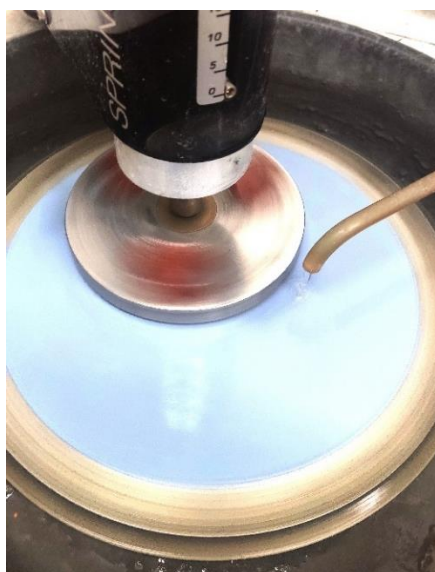


16 pav. Įrenginys mikrošlifams gaminti *LAM PLAN SMARTLAM 2.0* [33]

Šlifavimas atliekamas keturiais etapais. Kiekvieno etapo metu pakeičiama šlifavimo kryptis bei šlifavimo popierius keičiamas į vis smulkesnį (naudojamas P180, P600, P1500, P2500 šiurkštumo šlifavimo popierius). Po šlifavimo naudojant deimantinę emulsiją atliekamas paviršiaus poliravimas. Mikrošlifas poliruojamas tol, kol paviršius tampa veidrodinis be pastebimų įbrėžimų.



17 pav. Įtvirtinti ruošiniai



18 pav. Ruošinių paviršiaus šlifavimas

Po poliravimo lydinio paviršius ryškinimas naudojant 3 % azoto rūgšties (HNO_3) tirpalą. Pagamintų mikrošlifų terminio poveikio zonai tirti naudojamas *Zeiss AXIO Scope.A1* mikroskopas (žr. 19 pav.).



19 pav. Mikroskopas *Zeiss AXIO Scope.A1* [34]

Lazerio terminio poveikio vertinimas atliekamas analizuojant bei skirtingais objektyvais (skirtingu padidiniu) fiksuojant bandinių mikrostruktūros pokyčius. Siekiant įvertinti terminio poveikio zonos dydį kiekvienam bandiniui atliekama po dešimt matavimų ir apskaičiuojamas terminio poveikio zonos storio vidurkis.

2.5. Dirbtinio intelekto taikymas lazerinio pjovimo kokybės problemų sprendimui

Proceso matematiniam modeliavimui ir tobulinimui gali būti panaudojami įvairūs statistiniai, analitiniai metodai. Visgi, tobulinti lazerinio pjovimo procesą naudojant įprastus metodus yra sudėtinga, nes procesui įtakos turi daug skirtingų veiksnių. Dėl šios priežasties norint visapusiškai suprasti lazerinio pjovimo procesą, išspręsti kylančias kokybės problemas bei optimizuoti procesą reikia atlikti daug tyrimų. Vis dėlto, kiekvienas tyrimas reikalauja daug laiko ir išlaidų. Siekiant sumažinti eksperimentinių bandymų skaičių naudojami pažangesni dirbtiniu intelektu (DI) pagrįsti metodai, kurie net ir turint nedaug duomenų padeda nustatyti sudėtingus ryšius tarp proceso įvesties proceso parametrų ir išeities parametrų – kokybės charakteristikų [35].

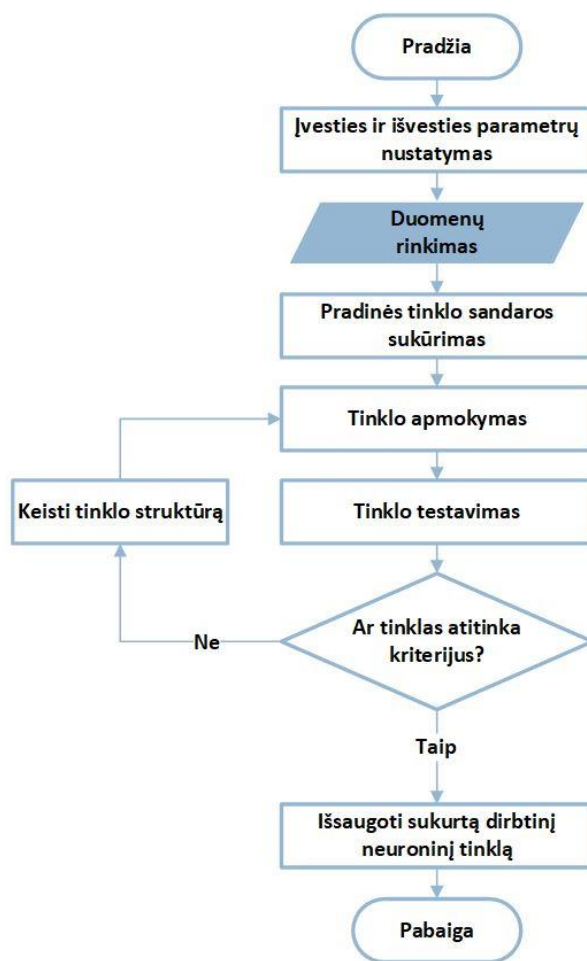
Vienas tokių šiuo metu populiariausių metodų yra dirbtiniai neuroniniai tinklai (DNT), kuris sprendžiant sudėtingas netiesines problemas imituoja žmogaus smegenų neuronų tinklą. Tokiu būdu turimas duomenų rinkinys paverčiamas į DNT struktūrą, kur atskiri duomenys sujungiami ryšiais. Dirbtinio neuroninio tinklo struktūrą sudaro du pagrindiniai sluoksniai, kuriuose yra neuronai: įvesties sluoksnyje esantys neuronai apibrėžia įvesties kintamuosius, o išvesties sluoksnio neuronai – siekiamas išvesties parametrų vertes. Be šių dviejų sluoksnių DNT sudaro ir paslėpti sluoksniai bei juose esantys neuronai, kurių skaičius priklauso nuo sprendžiamos problemos sudėtingumo [36]. Tiesioginio sklidimo (angl. *feed-forward*) DNT kūrimas, apmokymas, testavimas atliekamas remiantis algoritmu, pavaizduotu 20 paveiksle.

Dirbtiniai neuroniniai tinklai sprendžiant lazerinio pjovimo kokybės problemas turi ne vieną galimą panaudojimo sritį. Pavyzdžiui, sukurtas ir apmokytas neuroninis tinklas įvedus naujus įvesties parametrus gali prognozuoti išeities parametrus. Kita vertus, dirbtinis neuroninis tinklas gali būti panaudotas ir tikslo funkcijos (angl. *fitness function*) reikšmėms apskaičiuoti siekiant rasti lazerinio pjovimo parametrų vertes, kurias nustatys pjovimo kokybės charakteristikos įgytų optimalias vertes.

Taigi, atliktų lazerinio pjovimo kokybės tyrimų metu surinkti bandinių kokybės charakteristikų matavimo rezultatai toliau analizuojami naudojant *Matlab* programinės įrangos *Neural Network Toolbox* priedą, skirtą matematiniam modeliavimui naudojant dirbtinius neuroninius tinklus. Sukurto dirbtinio neuroninio tinklo tinkamumo įvertinimo kriterijumi pasirenkama vidutinė kvadratinė paklaida (angl. *mean squared error – MSE*), kuri parodo skirtumą tarp turimos tikrosios dėmens vertės ir prognozuotos naudojant sukurtą neuroninį tinklą. Tinklo struktūra pasirenkama, kai vidutinė kvadratinė paklaida mažiausia.

Siekiant rasti lazerinio pjovimo parametrų (lazerio galios, pjovimo greičio, pagalbinių dujų slėgio) rinkinį, kurį naudojant pjovimo metu būtų pasiekta optimali detalių kokybė, atliekamas optimizavimas naudojant *Matlab* funkciją *fmincon*, kuri pagrįsta gradientiniu nusileidimo (angl. *gradient descent*) optimizavimo metodu. Naudojant sukurtą dirbtinį neuroninį tinklą apskaičiuojama tikslo funkcijos vertė, kurią siekiama minimizuoti. Taigi, toks sukurtas optimizavimo modelis, pagrįstas dirbtiniu intelektu, naudojamas abiejų nagrinėjamų storių kokybės charakteristikoms optimizuoti. Remiantis optimizavimo metu gautais lazerinio pjovimo parametrų rinkiniais atliekamas

papildomas bandinių pjovimas ir šių bandinių kokybės charakteristikų matavimas. Gauti rezultatai lyginami su DNT prognozuotomis vertėmis ir įvertinamas optimizavimo tikslumas.



20 pav. DNT kūrimo žingsniai [35]

2.6. Skyriaus apibendrinimas

Lazerinio pjovimo kokybė gali būti įvertinama vizualiai bei atliekant kokybės charakteristikų tyrimus. Tik vizualus kokybės įvertinimas nėra tikslus, nes lazerinio pjovimo būdu pagaminta detalė, pasižyminti mažu paviršiaus šiurkštumu, nedideliu šlakų kiekiu gali būti netikslė, t. y. jos matmenys neatitiks standarte ISO 9013:2017 pateiktų detalių, kurių gamybai naudojami terminio pjovimo procesai, matmenų tolerancijų. Dėl šios priežasties siekiant kuo tiksliau įvertinti bandinių kokybę atliekami skyriuje aptarti pjūvio paviršiaus šiurkštumo, matmenų tikslumo, pjūvio kūgiškumo tyrimai, kurių atlikimui naudojama aptarta metodika bei įranga. Be to, svarbu paminėti, kad lazerinio pjovimo metu pjūvio zoną veikianti temperatūra gali turėti įtakos pjaunamo metalo lydinio mikrostruktūrai, todėl atliekamas ir terminio poveikio vertinimas. Siekiant optimalios pjovimo kokybės itin svarbus tinkamas pjovimo parametru parinkimas, todėl naudojant skyriuje aptartą metodiką sukuriamas dirbtiniu intelektu pagrįstas optimizavimo modelis bei atliekamas lazerinio pjovimo proceso optimizavimas. Taigi, skyriuje aptarti lazerinio pjovimo kokybės tyrimo metodai yra būtini siekiant iširti lazerinio pjovimo parametru įtaką „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei bei rasti geriausią parametru rinkinį.

3. Lazerinio pjovimo kokybės charakteristikų kiekybinis ir kokybinis vertinimas

Siekiant nustatyti kiekvieno analizuojamo parametro (pjovimo galios, pjovimo greičio, pagalbinių deguonies dujų slėgio) įtaką pjovimo kokybei, šių parametru vertės buvo keičiamos po 4 kartus. Taigi, buvo atlikta po 12 analizuojamų 4 ir 6 mm storio plieno lakštų pjovimo bandymų. Pasirinktos pjovimo parametru vertės pateiktos 6 ir 7 lentelėse.

6 lentelė. 4 mm storio bandinių pjovimo parametrai

Bandymo numeris	Lazerio galia, kW	Pjovimo greitis, mm/min	Deguonies pagalbinių dujų slėgis, bar	Linijinė energija, J/mm	Pastabos
4.01	3,8	3500	0,55	65,14	
4.02	4,0	3500	0,55	68,57	
4.03	3,2	3500	0,55	54,86	
4.04	2,8	3500	0,55	48,00	
4.05	3,8	3200	0,55	71,25	
4.06	3,8	4000	0,55	57,00	
4.07	3,8	4500	0,55	50,67	
4.08	3,8	2900	0,55	78,62	
4.09	3,8	3500	0,30	65,14	
4.10	3,8	3500	0,15	65,14	Neišpjautas
4.11	3,8	3500	1,00	65,14	
4.12	3,8	3500	1,50	65,14	

7 lentelė. 6 mm storio bandinių pjovimo parametrai

Bandymo numeris	Lazerio galia, kW	Pjovimo greitis, mm/min	Deguonies pagalbinių dujų slėgis, bar	Linijinė energija, J/mm	Pastabos
6.01	4,0	2900	0,60	82,76	
6.02	3,5	2900	0,60	72,41	
6.03	3,0	2900	0,60	62,07	
6.04	2,0	2900	0,60	41,38	Neišpjautas
6.05	4,0	3300	0,60	72,73	
6.06	4,0	3700	0,60	64,86	Neišpjautas
6.07	4,0	3500	0,60	68,57	
6.08	4,0	2400	0,60	100,00	
6.09	4,0	2900	2,00	82,76	
6.10	4,0	2900	3,00	82,76	
6.11	4,0	2900	4,00	82,76	
6.12	4,0	2900	1,50	82,76	

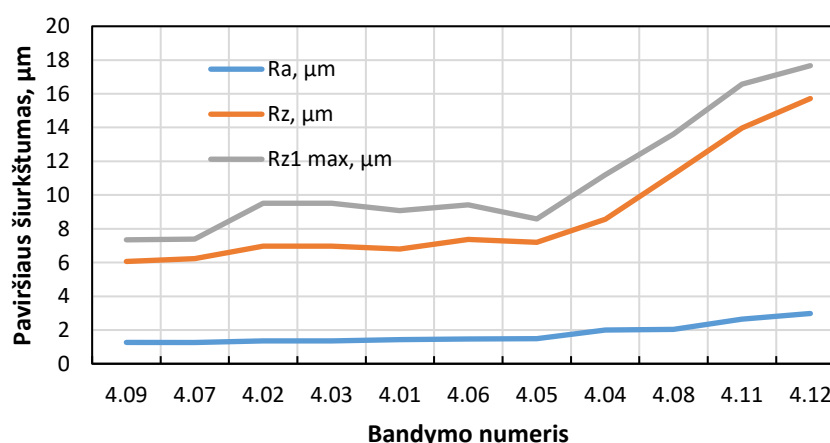
Remiantis 6 lentelėje pateiktais duomenimis matome, kad pjovimo bandymo 4.10 metu 4 mm storio bandinys nebuvo išpjautas. Nors pjovimo linijinė energija (65,14 J/mm) buvo pakankama medžiagos išlydymui, tačiau pagalbinių dujų slėgis buvo per mažas, kad išlydyta medžiaga būtų tinkamai pašalinta iš pjūvio zonos.

Analizuojant 6 mm storio pjovimo bandymų rezultatus, pateiktus 7 lentelėje, matoma, kad sumažinus lazerio galią iki 2 kW pjūvio zonai tenkanti linijinė energija sumažėjo iki 41,38 J/mm. Dėl per mažos pjūvio zoną veikiančios energijos 6.04 bandinio išpjauti nepavyko. Kita vertus, kitas bandinys (6.06) buvo neišpjautas, kai pjovimo greitis buvo padidintas iki 3700 mm/min, tačiau šiuo atveju linijinė energija buvo 64,86 J/mm. Galima pastebėti, kad 6.03 pjovimo bandymo metu, kai energija buvo mažesnė (62,07 J/mm) bandinys buvo išpjautas sėkmingai. Dėl šios priežasties galima teigti, kad nors ir pjovimo metu pasiekama linijinė energija pakankama, tačiau pjovimo greičio padidinimas turi didesnę įtaką tinkamam medžiagos pašalinimui iš pjūvio zonos nei lazerio galia.

3.1. Pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimas

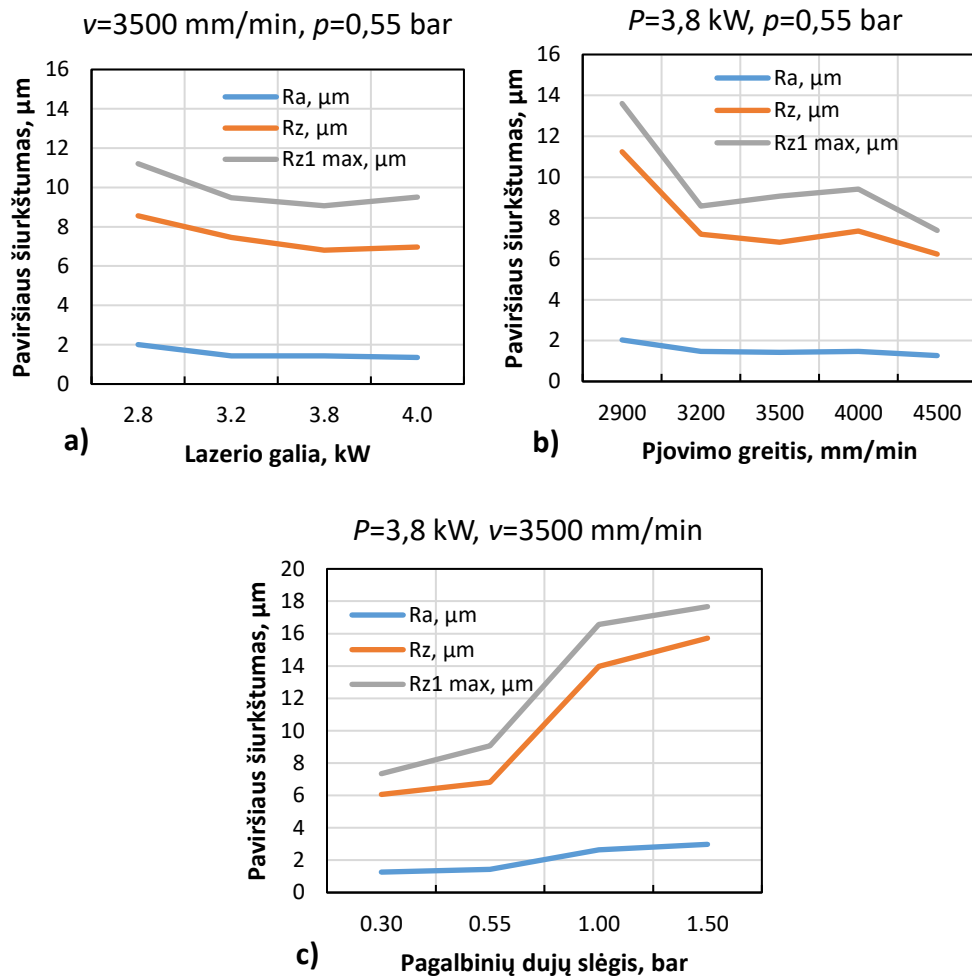
Siekiant nustatyti lazerinio pjovimo parametrų įtaką pjūvio paviršiaus šiurkštumui buvo išmatuotos 21 bandinio pjūvio paviršiaus šiurkštumo charakteristikos (neišpjautų bandinių paviršiaus šiurkštumas nebuvo matuotas). Bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumo charakteristikų R_a , R_z , R_{z1max} matavimo rezultatai pateikti 1 ir 2 prieduose. Gauti šiurkštumo charakteristikų rezultatai analizuojami vertinant išmatuoto šiurkštumo priklausomybę nuo lazerinio pjovimo parametrų, kuriais buvo išpjautas kiekvienas bandinys. Be to, įvertinta medžiagos storio įtaka pjūvio paviršiaus šiurkštumui, kai skirtingo storio bandiniai buvo išpjauti panašiais pjovimo parametrais.

Atlikus 4 mm storio bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimus galima teigti, kad pjovimo proceso parametrai turi reikšmingą įtaką pjūvio paviršiaus šiurkštumui. Analizuojant 21 paveiksle pateiktą grafiką, kur pjovimo bandymų seka išdėstyta vidutinio paviršiaus šiurkštumo (R_a) didėjimo tvarka, galima teigti, kad mažiausias vidutinis paviršiaus šiurkštumas (1,264 μm) buvo gautas pjovimo bandymo 4.09 metu, kai lazerio galia buvo lygi 3,8 kW, pjovimo greitis – 3500 mm/min, o pagalbinių dujų slėgis – 0,3 bar. Didžiausias vidutinis paviršiaus šiurkštumas, lygus 2,979 μm , išmatuotas pjovimo bandymo 4.12 metu, kai lazerio galia lygi 3,8 kW, pjovimo greitis – 3500 mm/min, tačiau pagalbinių dujų slėgis padidintas iki 1,5 bar.



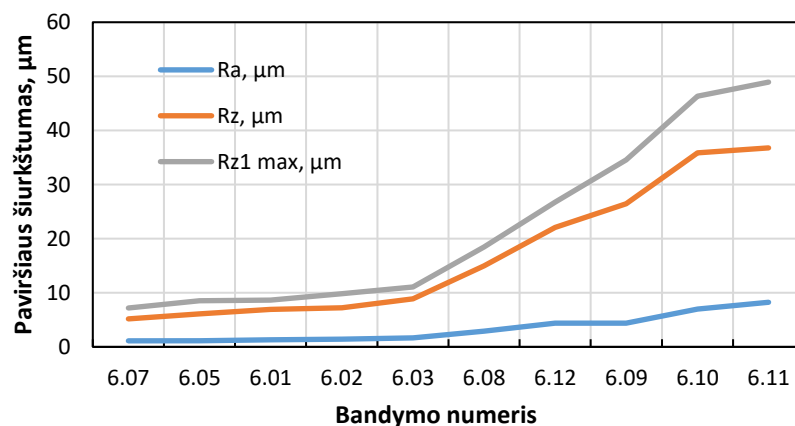
21 pav. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo kitimas

Analizuojant pjūvio paviršiaus šiurkštumo charakteristikų priklausomybės nuo pjovimo parametrų grafikus, pateiktus 22 paveiksle, galima teigti, kad didinant lazerio galią ir pjovimo greitį galima pasiekti mažesnę paviršiaus šiurkštumą. Kita vertus, priešingą šiurkštumo kitimo tendenciją galima pastebėti analizuojant pagalbinių pjovimo dujų slėgio įtaką, kai kiti pjovimo parametrai pastovūs ($P=3,8$ kW, $v=3500$ mm/min). Pjūvio paviršiaus šiurkštumo charakteristikų vertės mažiausios, kai pagalbinių dujų slėgis 0,3 bar, o didinant slėgį paviršiaus šiurkštumas taip pat didėja.



22 pav. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

Siekiant įvertinti medžiagos storio įtaką pjūvio paviršiaus šiurkštumui, buvo atliktas ir 6 mm storio bandinių matavimas. Gauti rezultatai pateikti 23 paveiksle.

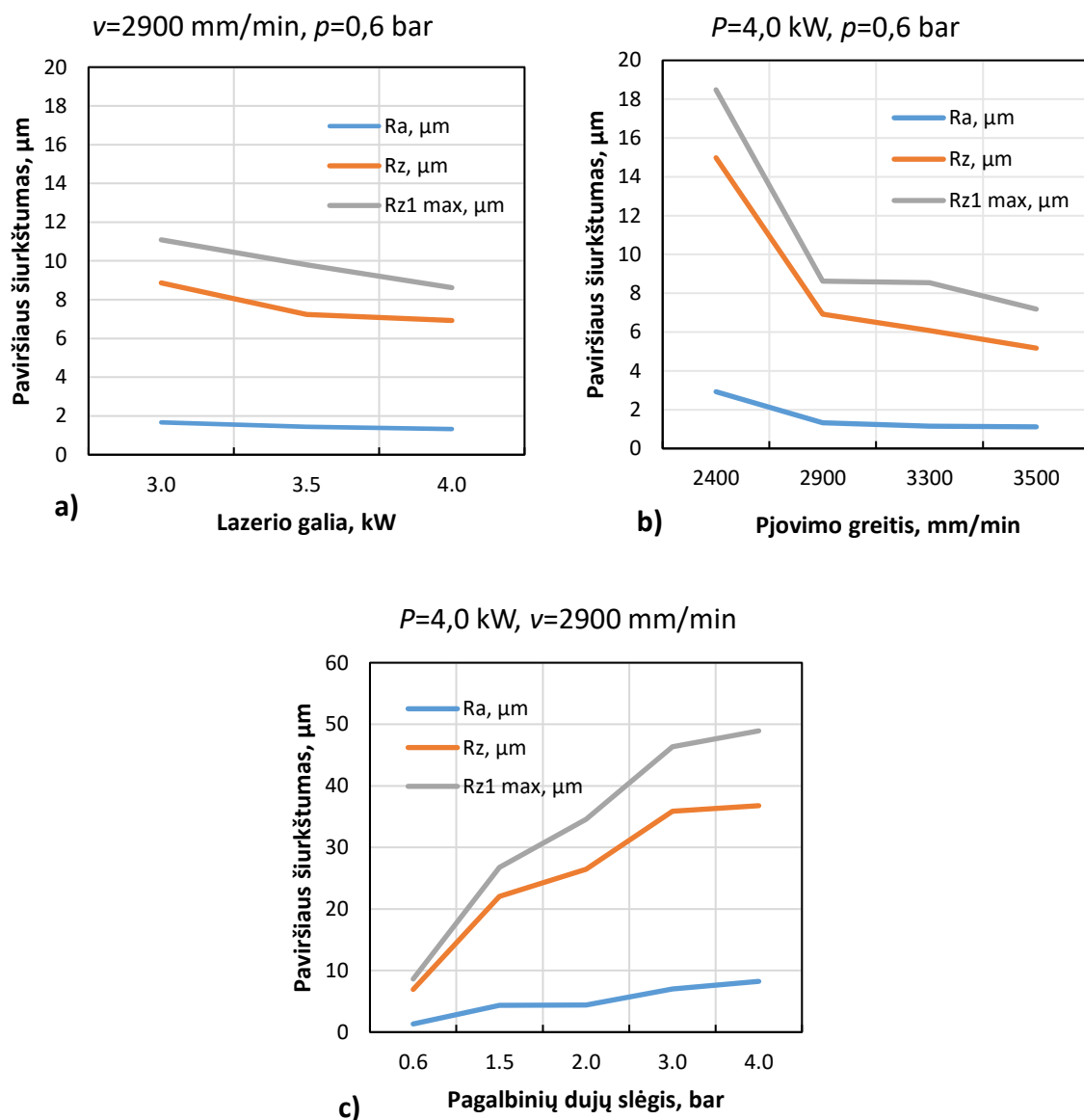


23 pav. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo kitimas

6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai rodo, kad mažiausias vidutinis paviršiaus šiurkštumas Ra ($1,116 \mu\text{m}$) buvo pasiektas pjūvio bandymo 6.07 metu, kai lazerio galia lygi $4,0 \text{ kW}$, pjovimo greitis – 3500 mm/min , o pagalbinių dujų slėgis $0,6 \text{ bar}$. Kita vertus, didžiausias

vidutinis paviršiaus šiurkštumas ($5,241 \mu\text{m}$) buvo nustatytas vertinant bandymo 6.11 parametrus ($P=4,0 \text{ kW}$, $v=2900 \text{ mm/min}$, $p=4,0 \text{ bar}$).

Analizuojant paviršiaus šiurkštumo charakteristikų priklausomybės nuo pjovimo parametrų grafikus (žr. 24 pav.), pastebimos tos pačios paviršiaus šiurkštumo kitimo tendencijos kaip ir aptartų 4 mm storio bandinių. Vis dėlto, lyginant panašiais pjovimo parametrais ($P=4 \text{ kW}$, $v=3500 \text{ mm/min}$, $p=0,55\text{--}0,6 \text{ bar}$) išpjautus skirtingo storio bandinius, 6 mm storio bandinio 6.07 vidutinis pjūvio paviršiaus šiurkštumas R_a lygus $1,116 \mu\text{m}$, yra mažesnis už 4.02 bandinio paviršiaus šiurkštumą ($1,353 \mu\text{m}$). Taigi, galima teigti, kad esant tiems patiems pjovimo parametrams, tačiau didėjant medžiagos storiui pjūvio paviršiaus šiurkštumas mažėja.



24 pav. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

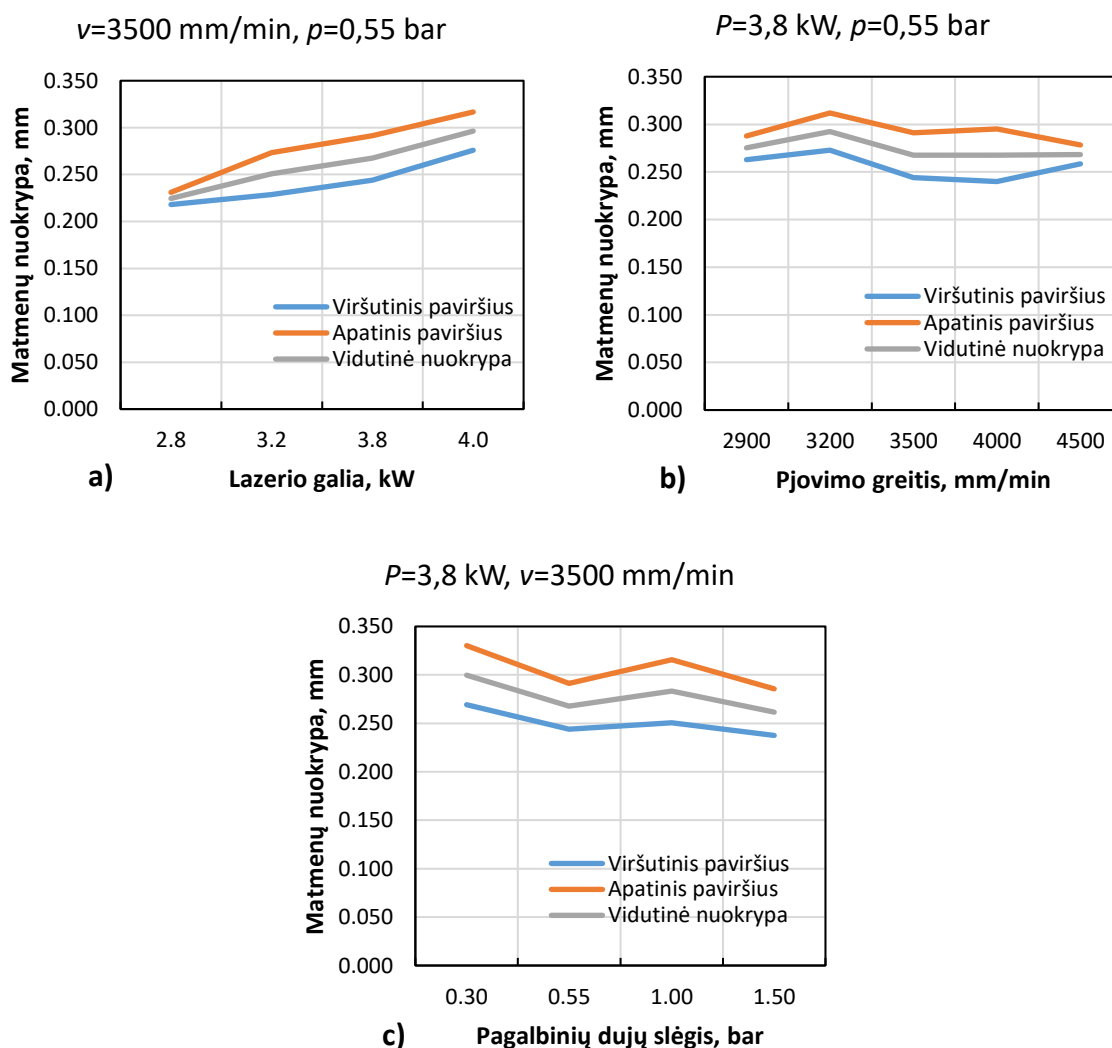
Apibendrinant galima teigti, kad atlikto pjūvio paviršiaus šiurkštumo tyrimo rezultatai patvirtina kitų mokslininkų atliktų tyrimų rezultatus. Pavyzdžiui, lyginant analizuotų 4 ir 6 mm storio bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimų rezultatus su kitu tyrimu [25], kai buvo atliekami 2 mm storio bandinių šiurkštumo matavimai, išpjautiems „fiber“ tipo lazeriu, galima daryti išvadą, kad nepriklausomai nuo medžiagos storio, pjūvio paviršiaus šiurkštumas didėja, kai mažinama lazerio

galia bei pjovimo greitis. Pagalbinių dujų slėgis taip pat svarbus paviršiaus šiurkštumui, nes esant per dideliame slėgiui paviršiaus šiurkštumas itin išauga.

3.2. Matmenų tikslumo vertinimas

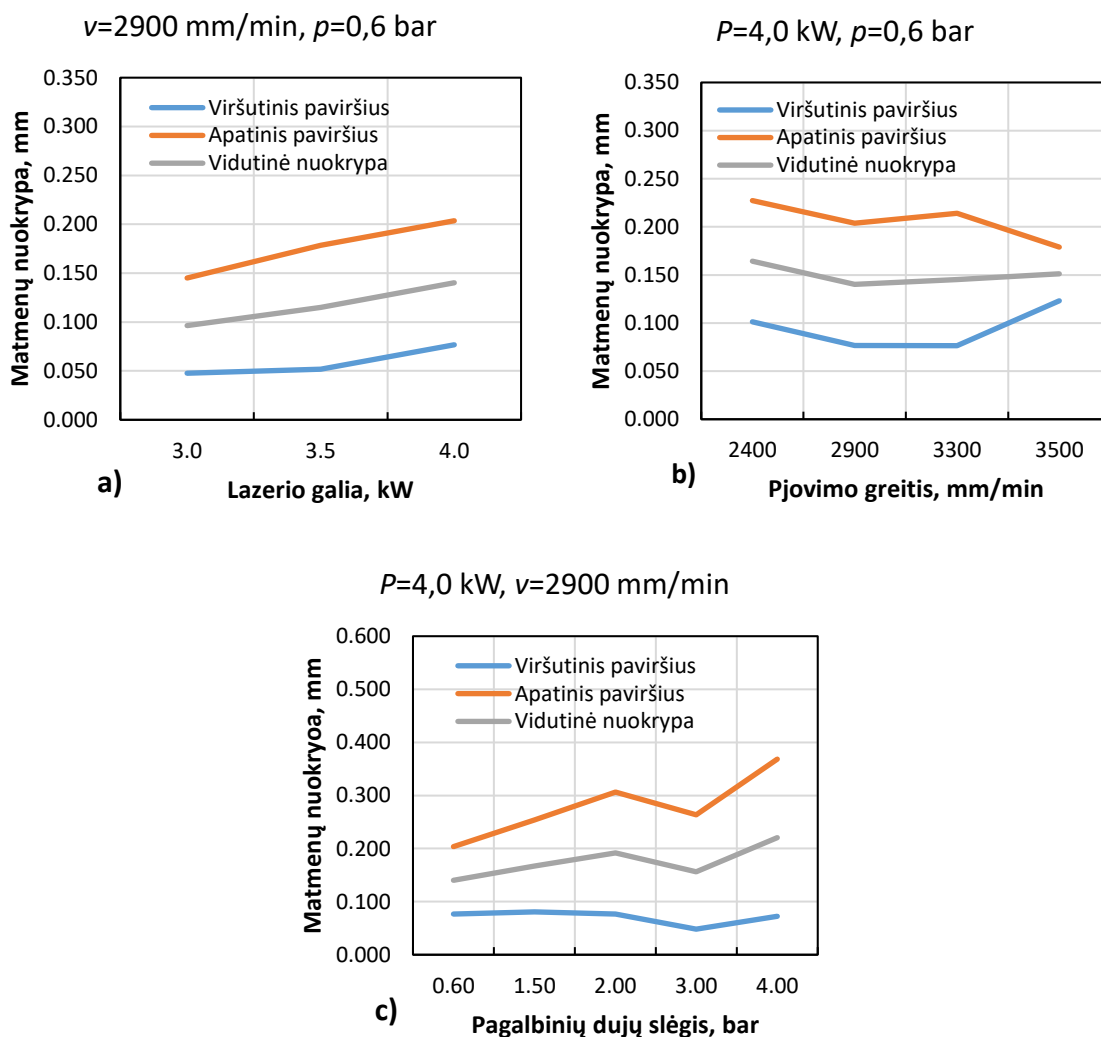
Lazerinio pjovimo proceso kokybė yra tiesiogiai susijusi ir su detalių matmenų tikslumu. Norint nustatyti, kaip skirtingi lazerinio pjovimo parametrai veikia išpjautų bandinių matmenis ir pjovimo tikslumą, buvo išmatuota po 15 kiekvieno bandinio matmenų apatiniame ir viršutiniame paviršiuose ir apskaičiuotos šių matmenų nuokrypos nuo nominaliųjų matmenų. Visi matavimo rezultatai pateikti 3 ir 4 prieduose.

Analizuojant 4 mm storio bandinių pjovimo tikslumo priklausomybės nuo parinktų lazerinio pjovimo parametrų grafikus, pateiktus 25 paveiksle, galima pastebėti, kad matmenų tikslumui įtakos turi tik lazerio galia. Didinant galią bandinio matmenų nuokrypa nuo nominaliųjų matmenų didėja, todėl pasiekiamas mažesnis pjovimo tikslumas. To priežastis galėtų būti tai, kad pjaunant didesnės galios lazerio spinduliu medžiaga lengviau išslydoma, todėl didesnis jos kiekis pašalinamas iš pjūvio zonos. Vertinant kitų nagrinėtų pjovimo parametrų poveikį galima teigti, kad pjovimo greičio bei pagalbinių dujų slėgio didinimas reikšmingos įtakos matmenų tikslumui neturi.



25 pav. 4 mm storio bandinių pjovimo tikslumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

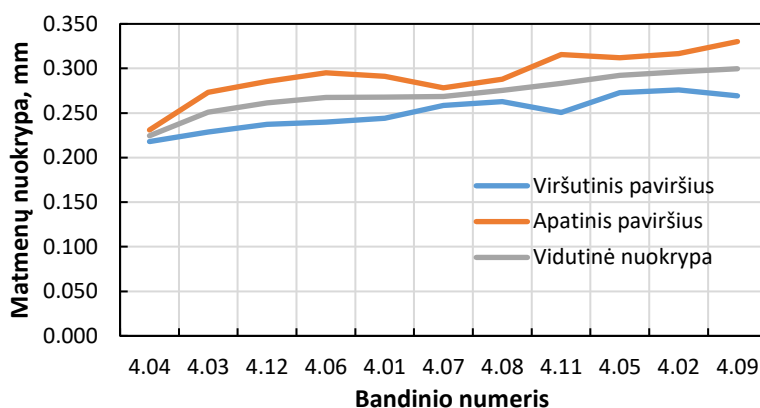
Vertinant pjovimo parametrų įtaką 6 mm storio bandinių pjovimo tikslumui (žr. 26 pav.) galima pastebėti tokį pat lazerio galios didėjimo poveikį pjovimo tikslumui, kaip ir 4 mm storio bandiniams. Vis dėlto, šiuo atveju matoma didesnė pagalbinių dujų slėgio įtaka matmenų tikslumui – didėjant pagalbinių dujų slėgiui mažėja pjovimo tikslumas. Svarbu paminėti, kad 6 mm storio bandinių pjovimas didinant pagalbinių dujų slėgį buvo atliktas esant platesniam pagalbinių dujų slėgio verčių diapazonui (nuo 0,6 bar iki 4 bar) nei aptartų 4 mm storio bandymų, kai pagalbinių dujų slėgis buvo didinamas tik iki 1,5 bar. Galima pastebėti, kad matmenų nuokrypa itin išauga padidinus slėgį iki 4 bar, todėl daroma prielaida, kad tokio pjovimo proceso metu dėl didelio pagalbinių dujų slėgio įrenginyje atsiranda didesni virpesiai, kurie mažina pjovimo tikslumą.



26 pav. 6 mm storio bandinių pjovimo tikslumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

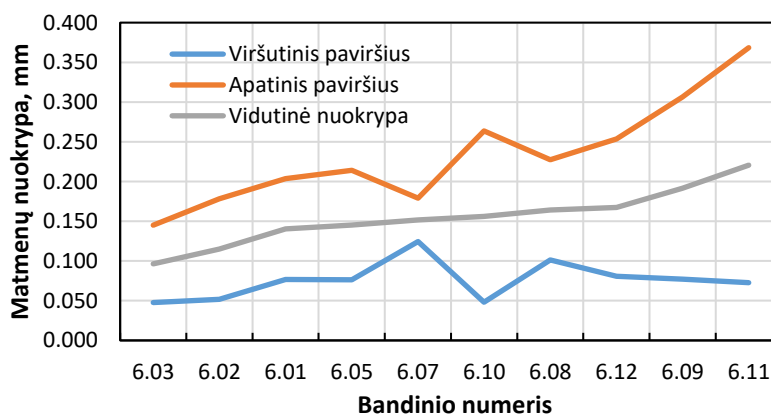
Kaip pavaizduota 27 paveiksle, didžiausias 4 mm storio medžiagos apdirbimo tikslumas, buvo pasiektas 4.04 bandymo metu ($P=2,8 \text{ kW}, v=3500 \text{ mm/min}, p=0,5 \text{ bar}$), kai vidutinė bandinio matmenų nuokrypa nuo nominaliųjų verčių lygi 0,225 mm. Visgi, remiantis ISO 9013:2017 standartu [17] matmenų tolerancija apdirbant 4 ir 6 mm storio plieno lakštą yra $\pm 0,2$ arba $\pm 0,25$ mm priklausomai nuo matuojamo matmens, todėl pasiektas 4.04 bandinio tikslumas tik iš dalies atitinka reikalavimus (5 matuotų matmenų vertės nepatenka į tolerancijos ribas). Kita vertus, mažiausias tikslumas (vidutinė matmenų nuokrypa lygi 0,3 mm) išmatuotas 4.09 bandymo metu išpjautam

bandiniui, kai lazerio galia lygi 3,8 kW, pjovimo greitis – 3500 mm/min, o pagalbinių dujų slėgis – 0,3 bar.



27 pav. 4 mm storio bandinių matmenų nuokrypos kitimas

Analizuojant gautas 6 mm storio bandinių tikslumo vertes pastebimas kur kas didesnis matmenų tikslumas (žr. 28 pav.). Mažiausia vidutinė matmenų nuokrypa (0,096 mm) išmatuota 6.03 bandiniui ($P=3,0$ kW, $v=2900$ mm/min, $p=0,6$ bar). Visos šio bandinio matuotų matmenų vertės patenka į standarto ISO 9013:2017 nustatytas tolerancijos ribas. Likusių 6 mm storio bandinių vidutinė matmenų nuokrypa didėja iki 0,221 mm, kuri buvo išmatuota 6.11 pjovimo bandymo metu, kai lazerio galia lygi 4,0 kW, pjovimo greitis – 2900 mm/min, pagalbinių dujų slėgis – 4 bar. Svarbu paminėti, kad šio bandinio viršutinio paviršiaus visi matuoti matmenys patenka į tolerancijos ribas (viršutinio paviršiaus nuokrypa lygi 0,073 mm), tačiau pastebimas itin prastas tikslumas bandinio apatiniame paviršiuje (0,368 mm). Galima teigti, kad dėl didelio pagalbinių dujų slėgio pjaunama medžiaga buvo lengviau pašalinama iš pjūvio zonos, todėl pjūvio plotis buvo didesnis. Be to, lyginant matmenų tikslumą skirtinguose abiejų nagrinėjamų storių bandinių paviršiuose, galima pastebėti, kad matmenų tikslumas viršutiniame paviršiuje yra didesnis.



28 pav. 6 mm storio bandinių matmenų nuokrypos kitimas

Gautus 6 mm storio bandinių matmenų tikslumo rezultatus galima palyginti su kitu atliktu panašiu tyrimu [8], kurio metu autoriai lygino CO₂ bei „fiber“ tipo lazerių pjovimo tikslumą apdirbant 6 mm storio plieną S235JR. Pjovimo bandymai buvo atlikti esant vienodai pjūvio zonai tenkančiai linijinei energijai, kuri lygi 55,4 J/mm. Autorių pasirinktas linijinės energijos dydis yra artimiausias 6.03 bandinio linijinei energijai, kuri buvo 62,07 J/mm. Šio bandinio nustatyta vidutinė matmenų nuokrypa (0,096 mm) yra didesnė nei matmenų nuokrypa, nustatyta autorių atlikto „fiber“ tipo lazerio tyrimo metu (0,066 mm). Vis dėlto, kaip buvo minėta anksčiau, šis 6 mm storio bandinys buvo tiksliausias, todėl galima daryti prielaidą, kad mažesnė linijinė energija lemia didesnę matmenų

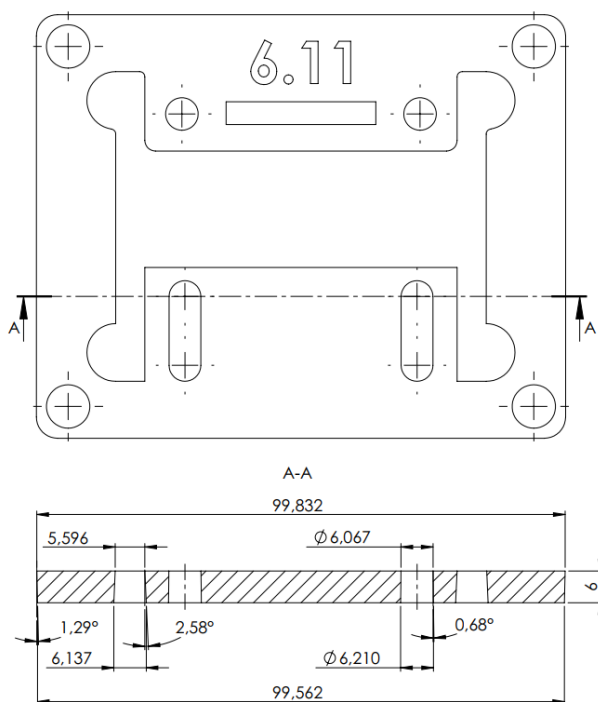
tikslumą [8]. Vertinant pjaunamos medžiagos storio įtaką matmenų tikslumui gautus rezultatus galima lyginti su kitu tyrimu [37], kurio metu buvo matuojamas pjūvio plotis CO₂ ir „fiber“ tipo lazeriais išpjautiems nerūdijančio plieno AISI 304 bandiniams, kurių storis nuo 1 iki 10 mm. Analizuojant gautus rezultatus daroma išvada, kad didesnis medžiagos storis lemia didesnę pjūvio plotį ir mažesnę matmenų tikslumą [37]. Ši tendencija yra priešinga gautiems 4 ir 6 mm storio plieno S355 rezultatams, nes 6 mm storio bandiniai buvo tikslesni. Dėl šios priežasties galima teigti, kad medžiagos pasirinkimas taip pat gali turėti didelę įtaką matmenų tikslumui.

Taigi, apibendrinant galima teigti, kad matmenų tikslumui įtakos turi pjaunama medžiaga, jos storis, lazerio galia. Kita vertus, pjovimui naudojant nedidelį pagalbinių dujų slėgį (iki 1,5 bar) šis parametras tikslumui reikšmingos įtakos neturi, tačiau jei slėgis didesnis (pvz., 4 bar), matmenų tikslumas sumažėja.

3.3. Pjūvio geometrijos taisyklingumo vertinimas

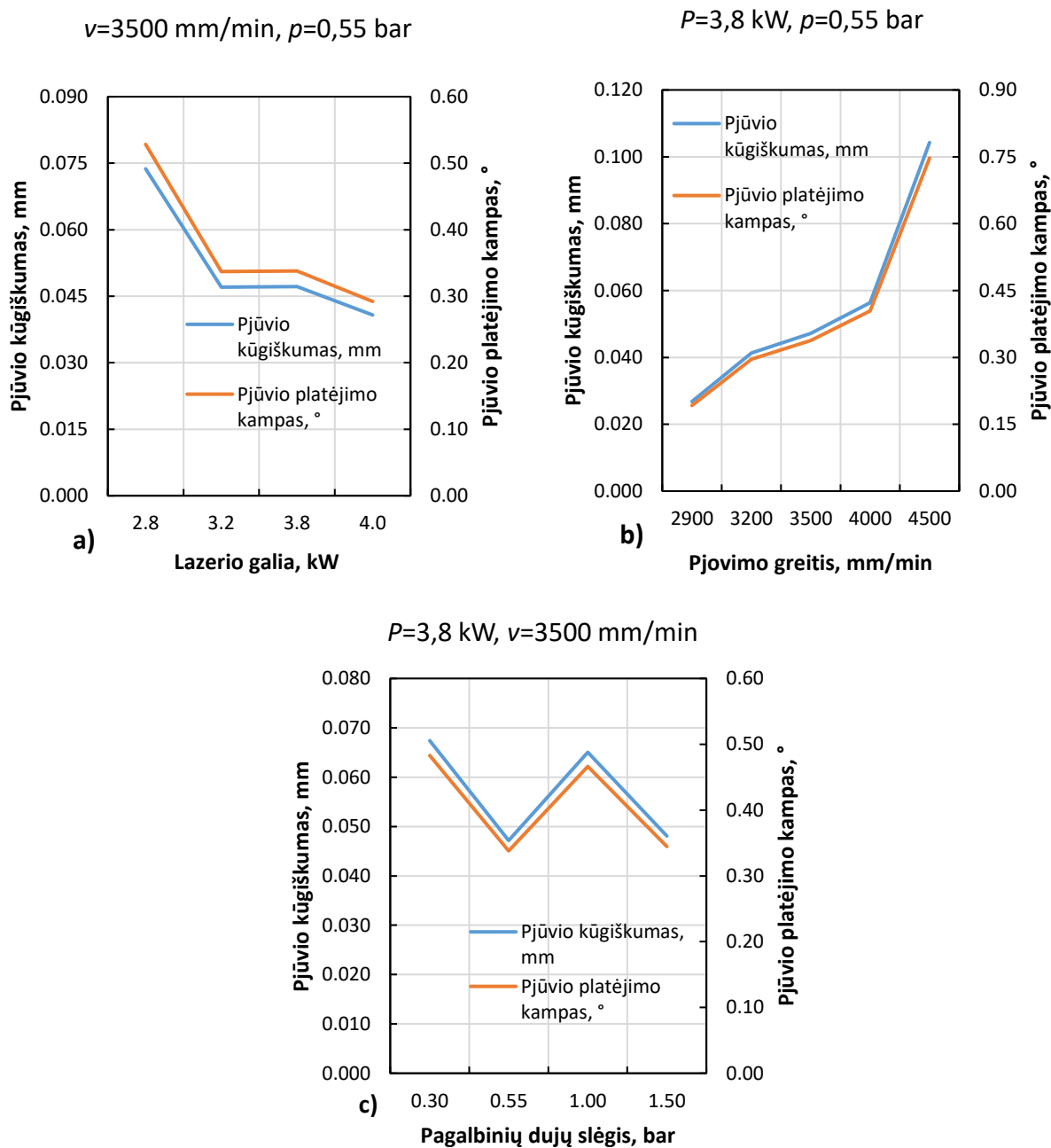
Dažnai pasitaikantis lazerinio pjovimo kokybės defektas yra netaisyklinga pjūvio geometrija. Taisyklingą statmeną pjūvį itin sunku pasiekti apdirbant storesnes medžiagas. Dėl šios priežasties gauti bandinių matavimo rezultatai skirtinguose bandinio paviršiuose naudojami pjūvio kūgiškumui įvertinti. Ši kokybės charakteristika apskaičiuojama iš matmens viršutiniame paviršiuje atėmus to paties matmens vertę apatiniame paviršiuje. Apskaičiuotos bandinių kūgiškumo vertės pateiktos 3 ir 4 prieduose.

Analizuojant gautas bandinių kūgiškumo vertes galima pastebėti, kad išorinių matmenų vertės viršutiniame bandinio paviršiuje (VP) yra didesnės nei apatiniame paviršiuje (AP), todėl kūgiškumas gaunamas teigiamas. Kita vertus, vertinant vidinių elementų VP ir AP verčių skirtumą, matoma, kad VP yra mažesnis nei AP, todėl kūgiškumas įgyja neigiamą vertę. Vis dėlto, akivaizdu, kad lazerio pjūvis, kaip pavaizduota 29 paveiksle, plėtėja apatinio pjūvio paviršiaus link pjūvio plėtėjimo kampu α .



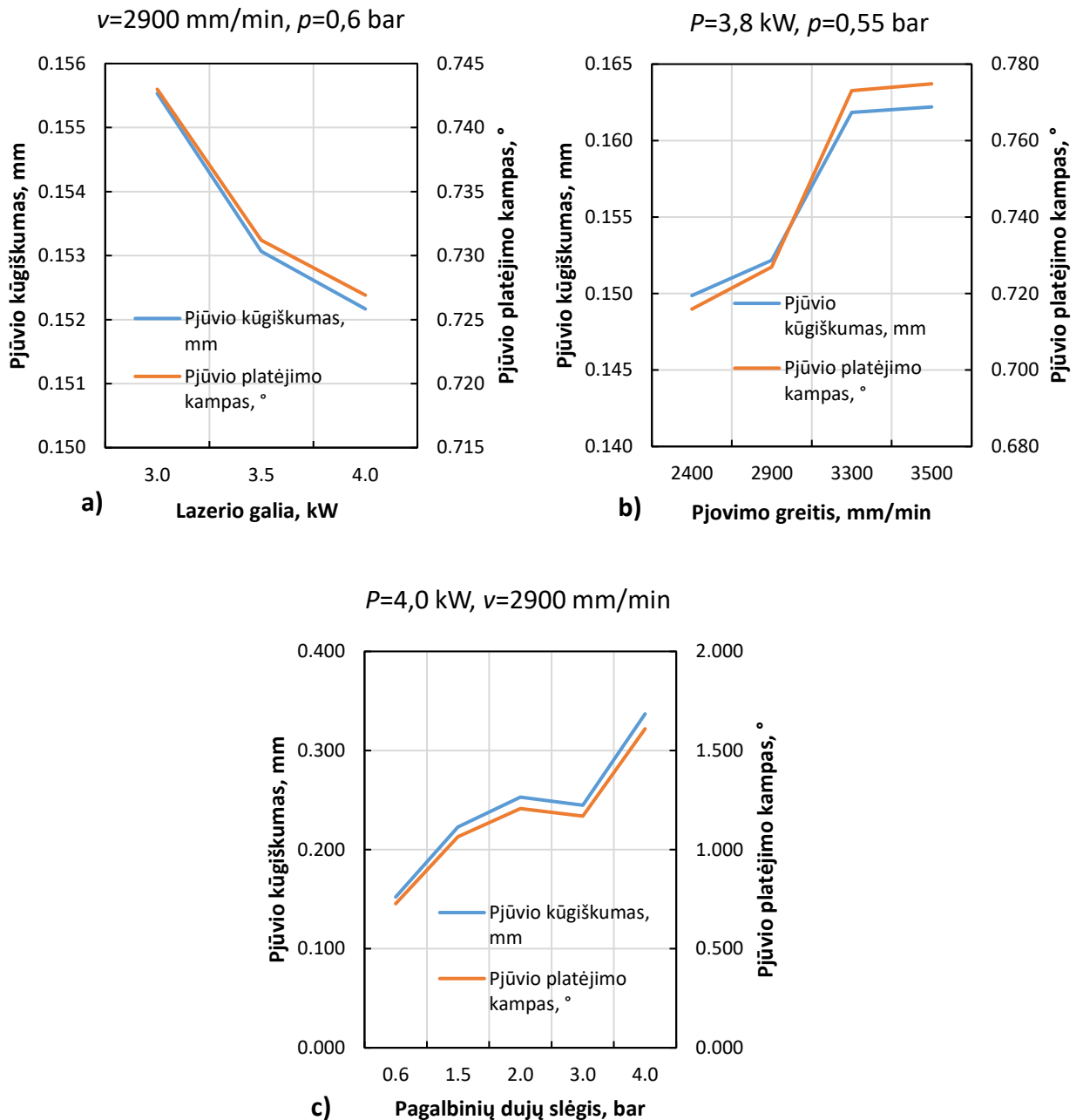
29 pav. 6.11 bandinio pjūvio kūgiškumas

Vertinant 30 paveiksle pateiktus 4 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo priklausomybės nuo pjovimo parametrų grafikus galima teigti, kad pjovimo parametrų pasirinkimas lemia ir pjūvio geometriją. Pavyzdžiui, didinant lazerio galią gali būti pasiektas mažesnis pjūvio kūgiškumas. Be to, mažesnis pjovimo greitis lemia taisyklingesnę pjūvio formą. Kita vertus, didinant pagalbinių dujų slėgį ribose nuo 0,3 bar iki 1,5 bar nepastebimas žymus pjūvio kūgiškumo pokytis.



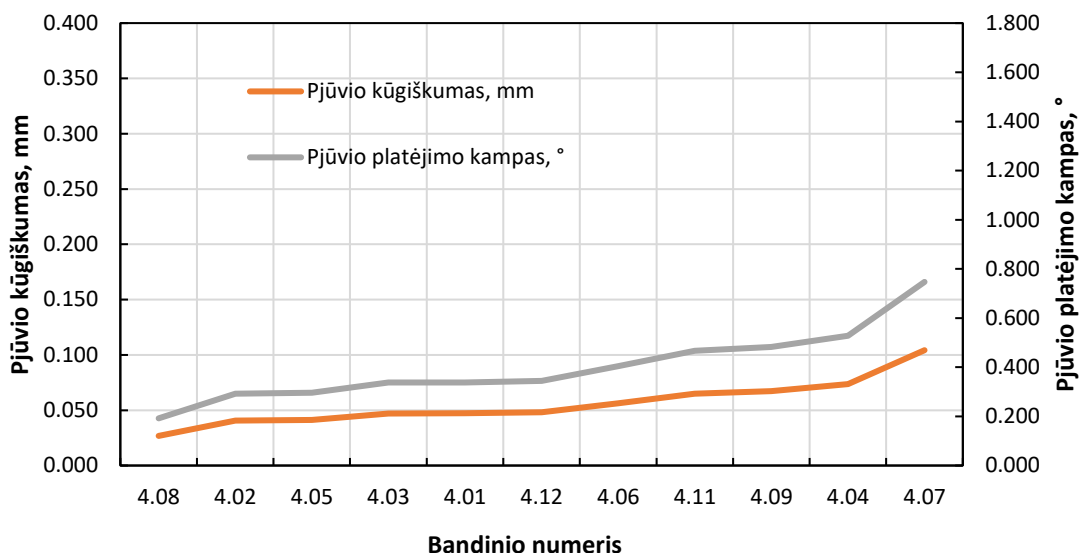
30 pav. 4 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

6 mm storio bandinių pjūvio geometrijos tikslumo priklausomybės nuo pjovimo parametrų grafikuose (žr. 31 pav.) matomos tokios pat pjūvio kūgiškumo kitimo tendencijos kaip ir 4 mm storio bandinių. Visgi, šiuo atveju galima pastebėti, kad didinant pagalbinių dujų slėgį platesniame verčių diapazone pjūvio kūgiškumas didėja. Taigi, galima teigti, kad tik žymus slėgio padidėjimas gali turėti įtakos pjūvio formai.



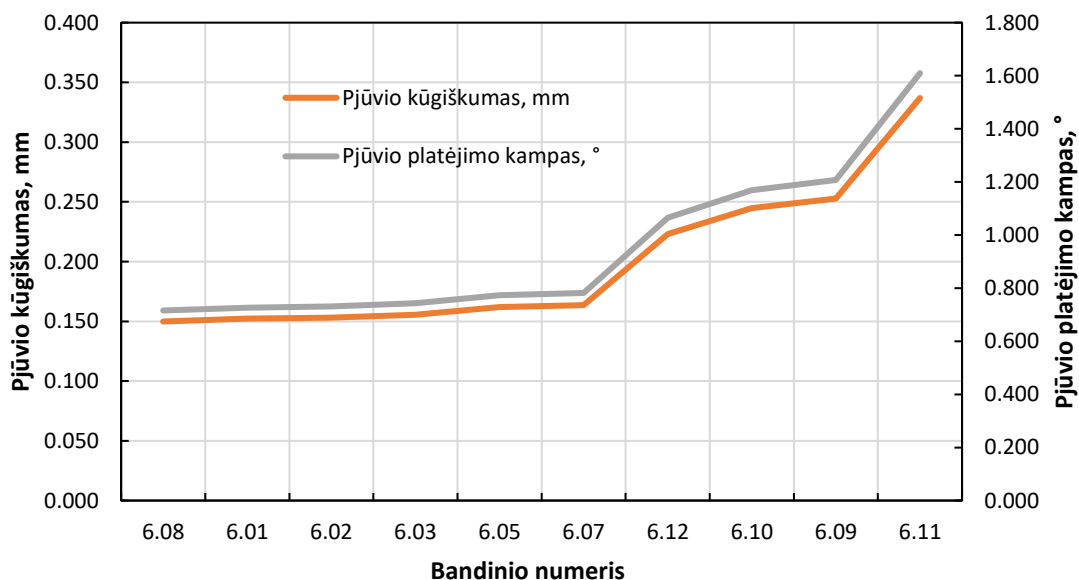
31 pav. 6 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo priklausomybė nuo pjovimo parametrų: a) lazerio galios P ; b) pjovimo greičio v ; c) pagalbinių dujų slėgio p

Analizuojant 32 paveiksle pateiktą grafiką, kur 4 mm storio pjovimo bandymų seka išdėstyta pjūvio kūgiškumo didėjimo tvarka, matoma, kad mažiausias pjūvio kūgiškumas (0,027 mm) ir platėjimo kampas (0,192°) nustatytas 4.08 bandymo metu, kai lazerio galia lygi 3,8 kW, pjovimo greitis – 2900 mm/min, pagalbinių deguonies dujų slėgis – 0,55 bar. Kita vertus, netaisyklingiausias pjūvis gautas pjaunant 4.07 bandinį ($P=3,8 \text{ kW}, v=4500 \text{ mm/min}, p=0,55$), kurio pjūvio kūgiškumas lygus 0,104 mm, o pjūvio platėjimo kampas – 0,747°. Galima pastebėti, kad lyginant šių dviejų bandinių pjovimo parametrus skiriasi tik pjovimo greitis, kurio padidėjimas lėmė netaisyklingą pjūvio geometriją.



32 pav. 4 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo kitimas

33 paveiksle pateikto grafiko kreivės vaizduoja 6 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo bei pjūvio platėjimo kampo kitimą. Didžiausias pjūvio geometrijos tikslumas, kai pjūvio kūgiškumas, lygus 0,15 mm, o pjūvio platėjimo kampas – $0,716^\circ$ nustatytas 6.08 bandymo metu ($P=4,0$ kW, $v=2400$ mm/min, $p=0,6$ bar) išpjautam bandiniui. Prasčiausi pjovimo rezultatai bei didžiausias pjūvio kūgiškumas buvo išmatuotas 6.09–6.12 bandiniams, kurių pjovimo metu buvo didinamas pagalbinių dujų slėgis. Dėl šios priežasties galima daryti išvadą, kad norint pasiekti taisyklingesnę pjūvio geometriją nerekomenduojama pjovimo metu naudoti didelio pagalbinių dujų slėgio. Lyginant abiejų analizuojamų storių bandinių pjūvio geometrijos tikslumą akivaizdu, kad didėjant apdirbamos medžiagos storiui pjūvio geometrijos tikslumas mažėja.



33 pav. 6 mm storio bandinių pjūvio kūgiškumo kitimas

Lyginant gautus rezultatus su kitais tyrimais galima pastebėti, kad gautas pjūvio platėjimas apatinio bandinio paviršiaus link nėra dažnas tyrinėjant lazerinio pjovimo procesą. Vis dėlto, galima pastebėti, kad pjūvio forma labiausiai priklauso nuo naudojamo lazerio tipo. Autoriai [37] atliko CO₂ ir „fiber“ tipo lazeriais apdirbtų nerūdijančio plieno AISI 304 bandinių pjūvio geometrijos palyginimą, kurio

metu pastebėta, kad CO₂ tipo lazeriui būdingas pjūvis, siaurėjantis apatinio paviršiaus link. Šiuos rezultatus patvirtina ir kitas tyrimas [22], kurio metu CO₂ tipo lazeriu buvo apdirbti aliuminio AlMg₃, mažo anglingumo plieno S235JR ir nerūdijančio plieno AISI 304 bandiniai. Galima teigti, kad medžiagos pasirinkimas neturėjo įtakos pjūvio formai, nes visais atvejais pastebėtas siauresnis pjūvis apatiniame bandinio paviršiuje. Analizuojant „fiber“ tipo lazerio pjūvio geometriją matomas kintančios geometrijos pjūvis, t. y. pjūvio platėjimas pastebimas tiek viršutinio, tiek apatinio paviršių link, o ties medžiagos viduriu pjūvis siaurėja [37]. Kita vertus, „fiber“ tipo lazerio tyrimo metu [21] buvo nustatytas ir pjūvio siaurėjimas apatinio paviršiaus link. Tyrimo metu 25 mm storio mažo anglingumo plieno S235JR lakšto apdirbimui buvo naudojamas 12 kW galios lazeris. Dėl šios priežasties galima daryti prielaidą, kad apdirbant storas medžiagas didelį pjūvio zonai tenkančios energijos kiekį sugeria apdirbama medžiaga, todėl pastebima kitokia pjūvio geometrija nei apdirbant plonesnes medžiagas. Taigi, pjūvio formą ir taisyklingumą lemia ne tik lazerinio pjovimo parametrai, tačiau ir pasirinktas lazerio tipas.

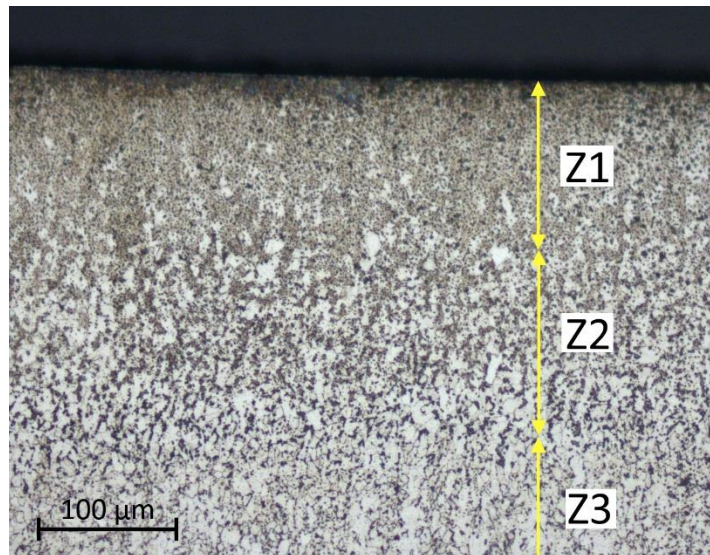
3.4. Lazerio terminio poveikio vertinimas

Lazerinio pjovimo proceso veikimo principas pagrįstas šilumine energija, todėl pjovimo metu sunku išvengti aukštos temperatūros poveikio pjaunamai medžiagai. Dėl šios priežasties buvo vertinamas lazerio terminis poveikis bandiniams. Bandymams, atsižvelgiant į atliktų kokybės charakteristikų matavimo rezultatus, buvo atrinkta po tris kiekvieno nagrinėjamo storio bandinius, kurie pasižymėjo sąlyginai gera (4.03 ir 6.02 bandiniai), vidutine (4.06 ir 6.08 bandiniai) ir žema pjovimo kokybe (4.11 ir 6.11 bandiniai). Terminio poveikio vertinimui iš šių bandinių buvo išpjauti smulkesni ruošiniai bei pagaminti mikrošlifai, pateikti 34 paveiksle.



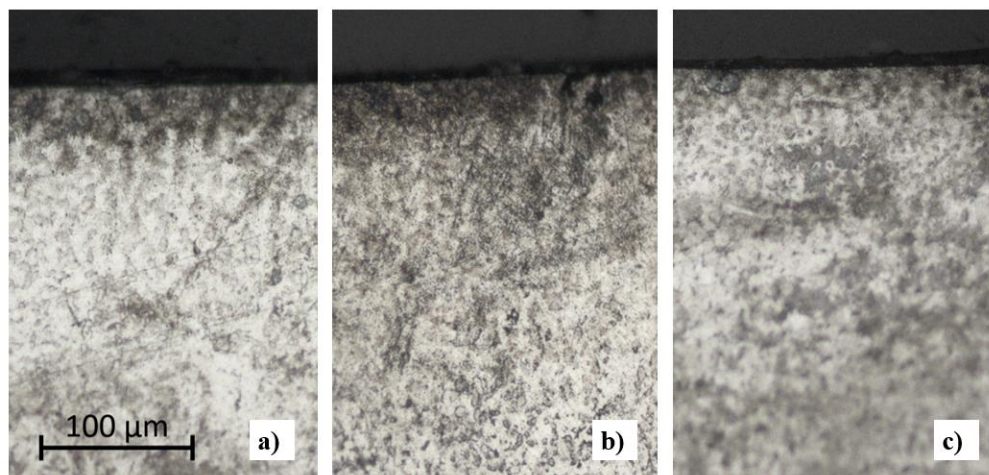
34 pav. Terminio poveikio tyrimo bandiniai

Lazerinio pjovimo proceso tyrimui naudojami mažo anglingumo plieno S355JR bandiniai. Dėl nedidelio anglies kiekio (0,23 %) lydinio mikrostruktūra sudaryta iš ferito ir perlito grūdelių. Analizuojant lydinio mikrostruktūrą po lazerinio pjovimo proceso (žr. 35 pav.) galima pastebėti, kad aukšta temperatūra paveikė šalia pjūvio esančios srities mikrostruktūrą. Nors lydinys nepatyrė akivaizdžių struktūrinių pokyčių, tačiau temperatūros paveiktoje perlydytoje metalo lydinio srityje matomos trys zonos: terminio poveikio zona (Z1), pereinamoji zona (Z2) ir likęs temperatūros nepaveiktas lydinys (Z3).

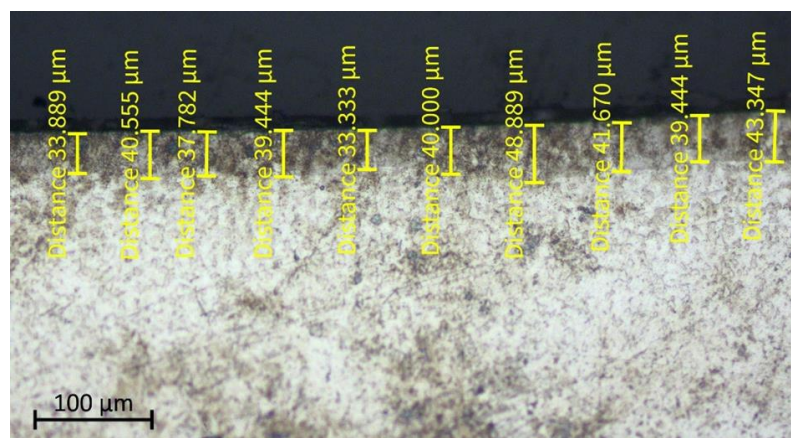


35 pav. Plieno S355JR mikrostruktūra po lazerinio pjovimo proceso

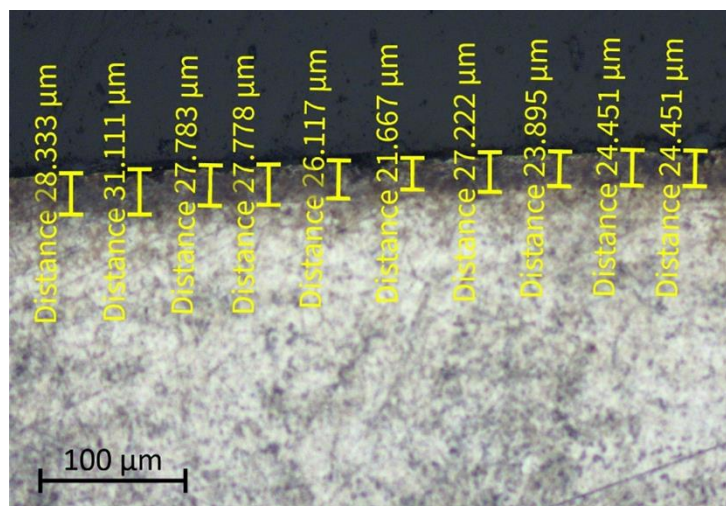
Analizuojant 4 mm storio bandinius, kurių mikrostruktūros vaizdai pateikti 36 paveiksle, pastebima siaura terminio poveikio zona, kurios storis yra apie 33 μm. Buvo atlikta po dešimt kiekvieno vertinamo bandinio terminio poveikio zonos matavimų. Bandinių matavimai pateikti 37–39 paveiksluose.



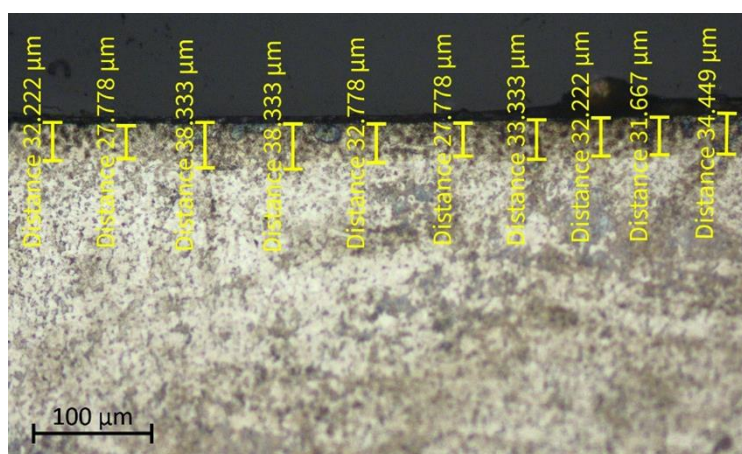
36 pav. 4 mm storio bandinių mikrostruktūros: a) 4.03 bandinys; b) 4.06 bandinys; c) 4.11 bandinys



37 pav. 4.03 bandinio terminio poveikio zonos matavimas

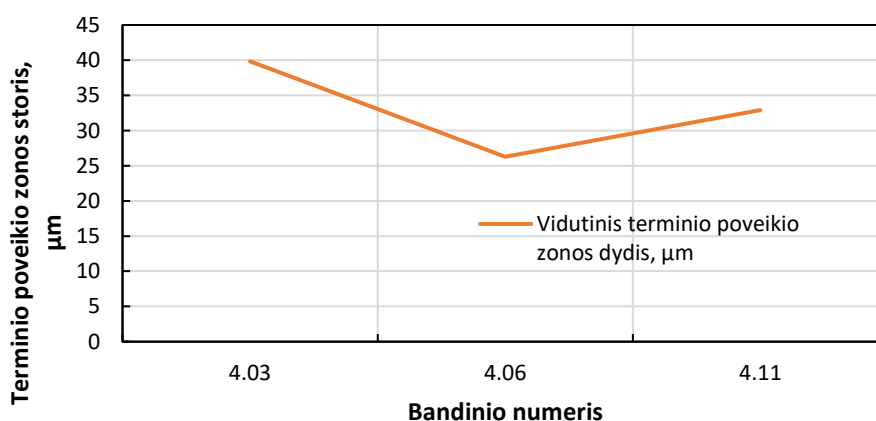


38 pav. 4.06 bandinio terminio poveikio zonos matavimas



39 pav. 4.11 bandinio terminio poveikio zonos matavimas

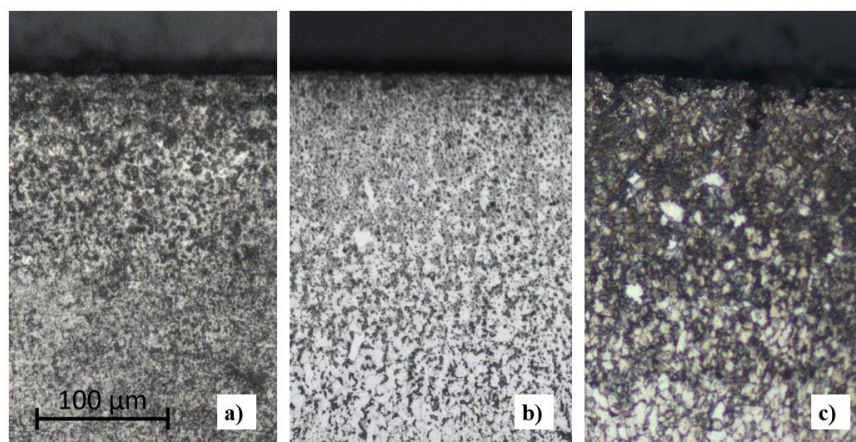
Analizuojant 40 paveiksle pateiktą grafiką, galima pastebėti, kad vertintų 4 mm storio skirtingos pjovimo kokybės bandinių terminio poveikio zonos storis kinta nuo 26,281 μm iki 39,835 μm .



40 pav. 4 mm storio bandinių vidutinio terminio poveikio kitimas

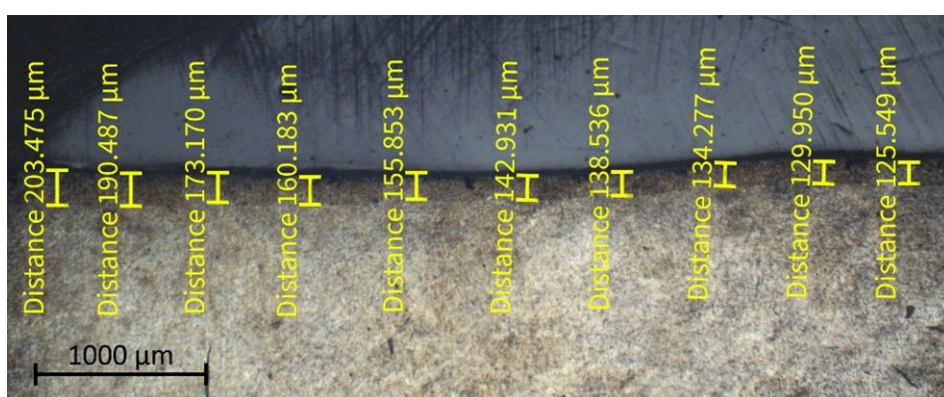
Svarbu paminėti, kad 4.03 bandinys pasižymėjo gerais paviršiaus šiurkštumo bei matmenų tikslumo rezultatais, tačiau šio bandinio vidutinė terminio poveikio zona yra didžiausia (39,835 μm). Dėl šios priežasties galima teigti, kad nors ir lazerinio pjovimo būdu apdirbta detalė pasižymi sąlyginai gera kokybe, tačiau terminis poveikis gali būti didesnis.

Vertinant lazerinio pjovimo metu medžiagą veikiančios aukštos temperatūros įtaką 6 mm storio bandiniams galima pastebėti, kad terminis poveikis metalo lydinio mikrostruktūrai (žr. 41 pav.) yra kur kas didesnis nei aptartų 4 mm storio bandinių. Šiuo atveju vidutinė bandinių terminio poveikio zona yra 205,665 μm .

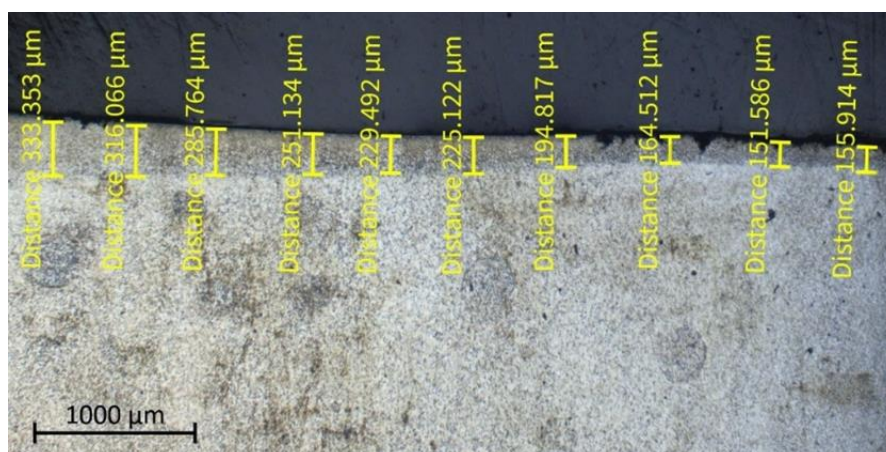


41 pav. 6 mm storio bandinių mikrostruktūros: a) 6.02 bandinys; b) 6.08 bandinys; c) 6.11 bandinys

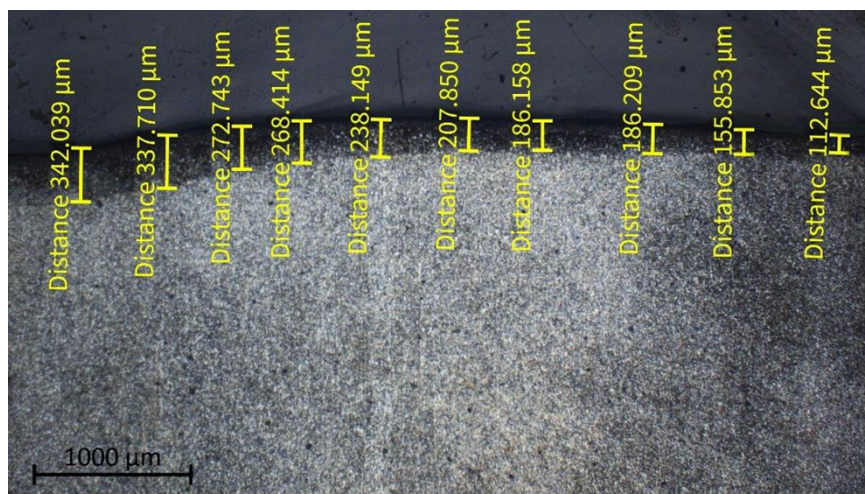
Nagrinėjant 6 mm storio bandinių terminio poveikio zoną galima pastebėti, kad ši zona yra siauresnė lazerio pjūvio viršutiniame paviršiuje, nes medžiaga, išlydyta bandinio viršutiniame paviršiuje, teka žemyn ir įkaitina pjūvio apatinį paviršių, kur matomas didesnis terminis poveikis. Bandinių matavimai pateikti 42–44 paveiksluose.



42 pav. 6.02 bandinio terminio poveikio zonos matavimas

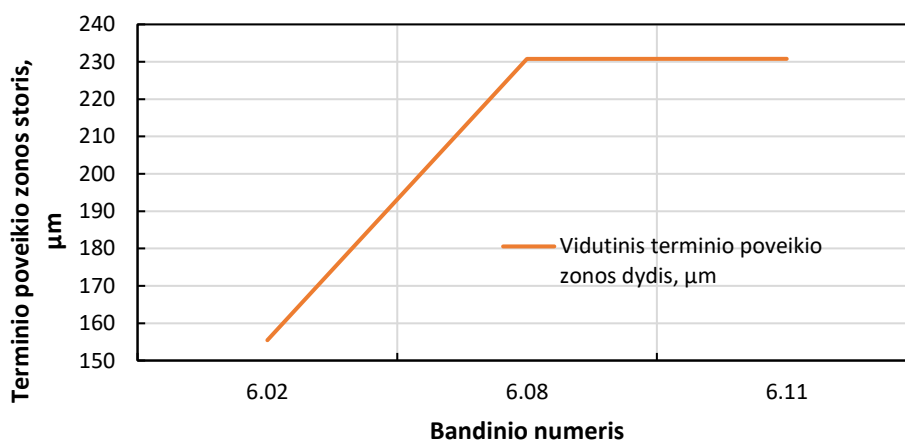


43 pav. 6.08 bandinio terminio poveikio zonos matavimas



44 pav. 6.11 bandinio terminio poveikio zonos matavimas

Analizuojant 45 paveiksle pateiktą grafiką galima pastebėti, kad 6 mm storio bandinių terminio poveikio zona kinta nuo 155,441 μm iki 230,779 μm . Didžiausia terminio poveikio zona nustatyta 6.11 bandiniui, kurio pjūvio paviršiaus kokybė ir tikslumas buvo prasčiausias iš visų tirtų 4 ir 6 mm storio bandinių.



45 pav. 6 mm storio bandinių vidutinio terminio poveikio kitimas

Lyginant 4 ir 6 mm storio bandinių terminio poveikio zonos storį, akivaizdu, kad 4 mm storio bandymų metu metalo lydinių veikė mažesnis šilumos kiekis. Remiantis 8 ir 9 lentelėse pateiktais duomenimis galima teigti, kad to priežastis galėtų būti linijinės energijos kiekio, tenkančio pjūvio zonai lazerinio pjovimo metu, skirtumas. Norint išpjauti 4 mm storio bandinį reikalinga linijinė energija yra mažesnė nei apdirbant 6 mm storio medžiagą.

8 lentelė. 4 mm storio bandinių terminio poveikio zonos matavimo rezultatai

Bandymo numeris	Lazerio galia, kW	Pjovimo greitis, mm/min	Pagalbinių dujų slėgis, bar	Linijinė energija, J/mm	Vidutinis terminio poveikio zonos storis, μm
4.03	3,2	3500	0,55	54,86	39,835
4.06	3,8	4000	0,55	57,00	26,281
4.11	3,8	3500	1,00	65,14	32,889
Vidurkis:					33,002

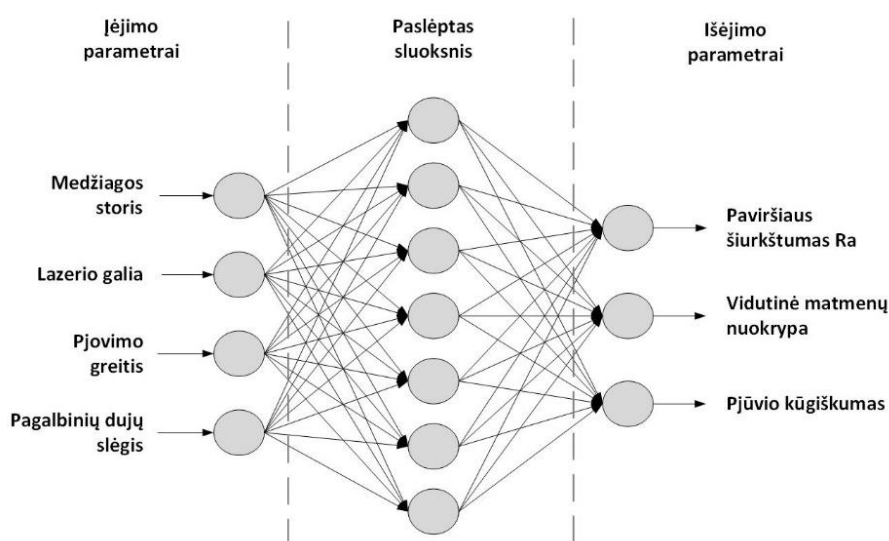
9 lentelė. 6 mm storio bandinių terminio poveikio zonos matavimo rezultatai

Bandymo numeris	Lazerio galia, kW	Pjovimo greitis, mm/min	Pagalbinių dujų slėgis, bar	Linijinė energija, J/mm	Vidutinis terminio poveikio zonos storis, μm
6.02	3,5	2900	0,60	72,41	155,441
6.08	4,0	2400	0,60	100,00	230,776
6.11	4,0	2900	4,00	82,76	230,779
Vidurkis:					205,665

Gautus terminio poveikio zonos matavimo rezultatus galima lyginti su kitais tyrimais. Pavyzdžiui, autoriai [12] atliko 8 mm storio plieno S235JR terminio poveikio vertinimą ir nustatė, kad vidutinis terminio poveikio zonos dydis yra 170 μm . Svarbu paminėti, kad šis tyrimas buvo atliktas pjovimui naudojant CO₂ tipo lazerį. Taigi, dėl šios priežasties galima teigti, kad storesnes medžiagas apdirbant „fiber“ tipo lazeriu susiduriama su didesniu temperatūros poveikiu pjaunamai medžiagai nei apdirbimui naudojant CO₂ tipo lazerį. Kito tyrimo [23] metu keičiant lazerio galią ir pjovimo greitį buvo apdirbamas 6 mm storio plieno C45 lakštas. Analizuojant terminio poveikio zonos storį buvo nustatyta, kad ši zona yra didesnė, kai pjovimo naudojama didelė lazerio galia ir mažas pjovimo greitis [23]. Tokią tendenciją galima pastebėti ir lyginant 6.02 ir 6.11 bandinių pjovimo parametrus. Šie du bandiniai buvo išpjauti vienodu greičiu ($v=2900$ mm/min), tačiau 6.11 bandymo metu padidinta galia ($P=4$ kW) lėmė didesnę terminio poveikio zonos dydį.

3.5. Lazerinio pjovimo kokybės optimizavimas

Gauti lazerinio pjovimo kokybės charakteristikų tyrimų rezultatai toliau naudojami kuriant dirbtiniu intelektu pagrįstą dirbtinį neuroninį tinklą, kurio įvesties parametrai yra metalo lakšto storis, lazerio galia, pjovimo greitis, pagalbinių dujų slėgis. Nustatytos bandinių kokybės charakteristikos (paviršiaus šiurkštumas Ra, vidutinė matmenų nuokrypa, pjūvio kūgiškumas) pasirinktos kaip DNT išėjimo parametrai (žr. 46 pav.).



46 pav. Sukurto dirbtinio neuroninio tinklo struktūra

Dirbtiniam neuroniniam tinklui apmokyti buvo naudojami penkiolikos išpjautų bandinių duomenys, o likę šeši duomenų rinkiniai panaudoti sukurto tinklo testavimui. Siekiant parinkti geriausios

struktūros neuroninį tinklą, apmokymas buvo atliktas, kai paslėptame sluoksnyje yra nuo dviejų iki dvidešimt neuronų. Visų sudarytų struktūrų neuroniniams tinklams apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida tarp tikros ir prognozuojamos verčių. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad tiksliausias prognozavimas gaunamas, kai paslėptame sluoksnyje yra septyni neuronai.

Siekiant rasti lazerinio pjovimo parametrus, su kuriais būtų pasiekta optimali kokybė, sprendžiamas minimizavimo uždavinys, nes siekiama, kad pjovimo metu būtų užtikrintas kuo mažesnis vidutinis paviršiaus šiurkštumas (Ra), mažiausia vidutinė matmenų nuokrypa nuo nominalių matmenų verčių (VMN) bei mažiausias pjūvio kūgiškumas (PK). Sukurtas dirbtinis neuroninis tinklas naudojamas norint prognozuoti šių kokybės charakteristikų reikšmes esant tam tikram lazerinio pjovimo parametrų rinkiniui, kuris nebuvo išbandytas pjovimo bandymų metu. Kombinuota tikslo funkcija Z , kurios reikšmę siekiame minimizuoti, yra apskaičiuotų kokybės charakteristikų suma, apskaičiuojama pagal (5) formulę:

$$Z = Ra(t, P, v, p) + VMN(t, P, v, p) + PK(t, P, v, p); \quad (5)$$

čia Ra – vidutinis paviršiaus šiurkštumas, μm ; VMN – vidutinė matmenų nuokrypa, mm ; PK – pjūvio kūgiškumas, mm ; t – medžiagos storis, mm ; P – lazerio galia, kW ; v – pjovimo greitis, mm/min ; p – pagalbinių dujų slėgis, bar .

Remiantis atliktų pjovimo bandymų rezultatais buvo nustatytos pjovimo parametrų viršutinės ir apatinės ribos, kur turi būti atliekamas optimizavimas, kai medžiagos storis:

- 4 mm – $2,8 \leq P \leq 4,0$; $2900 \leq v \leq 4500$; $0,30 \leq p \leq 4$;
- 6 mm – $3,0 \leq P \leq 4,0$; $2900 \leq v \leq 3500$; $0,55 \leq p \leq 4$.

Siekiant rasti tinkamus pjovimo parametrus, kad pjovimo kokybė būtų optimali, optimizavimas atliekamas kiekvienam storiui. 4 mm storiui sprendinys buvo rastas atlikus 32 iteracijas, kai tikslo funkcijos reikšmė buvo lygi 1,853. 6 mm storiui skaičiavimai buvo atlikti 33 kartus tol, kol buvo rastas geriausias tikslo funkcijos sprendinys, lygus 1,718. Apskaičiuoti optimalūs pjovimo parametrai pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. Apskaičiuoti optimalūs pjovimo parametrai

Bandinio numeris	Lazerio galia, kW	Pjovimo greitis mm/min	Pagalbinių dujų slėgis, bar	Atliktų iteracijų skaičius	Tikslo funkcijos reikšmė
4.13	3	2900	0,4	32	1,853
6.13	3,9	3240	0,55	33	1,718

Siekiant įvertinti optimizavimo tikslumą naudojant gautus pjovimo parametrus buvo išpjauti 4.13 ir 6.13 bandiniai bei išmatuotos šių bandinių kokybės charakteristikos – paviršiaus šiurkštumas Ra , matmenų nuokrypa, pjūvio kūgiškumas. Gauti rezultatai pateikti 11 ir 12 lentelėse.

11 lentelė. 4.13 bandinio prognozuotos ir realios kokybės charakteristikų vertės

	Prognozuota vertė	Realė vertė	Skirtumas
Paviršiaus šiurkštumas Ra , μm	1,344	1,609	+0,265
Matmenų nuokrypa, mm	0,361	0,206	-0,155
Pjūvio kūgiškumas, mm	0,148	0,195	+0,047

12 lentelė. 6.13 bandinio prognozuotos ir realios kokybės charakteristikų vertės

	Prognozuota vertė	Realė vertė	Skirtumas
Paviršiaus šiurkštumas Ra, μm	1,432	1,930	+0,498
Matmenų nuokrypa, mm	0,145	0,080	-0,065
Pjūvio kūgiškumas, mm	0,141	0,103	-0,038

Analizuojant gautas realias kokybės charakteristikų vertes su dirbtiniu neuroniniu tinklu pagrįsto modelio prognozuotomis vertėmis galima pastebėti, kad realios kokybės charakteristikų vertės skiriasi nuo prognozuotų, tačiau skirtumas nedidelis, todėl galima teigti, kad sukurtas modelis veikia tinkamai. Lyginant 4.13 ir 6.13 bandinių, išpjautų atlikus proceso optimizavimą, kokybės charakteristikų rezultatus su kitais bandiniais galima pastebėti, kad optimizavimas buvo atliktas padidinant pjūvio paviršiaus šiurkštumą, tačiau siekiant geresnio matmenų tikslumo bei mažesnio pjūvio kūgiškumo.

Svarbu paminėti, kad dirbtinių neuroninių tinklų veikimo principas pagrįstas mokymosi procesu. Kuo didesnis tinklo apmokymui naudojamų duomenų kiekis, tuo tiksliau sukurtas dirbtinis neuroninis tinklas gali prognozuoti kokybės charakteristikų vertes bei atlikti proceso optimizavimą. Dėl šios priežasties siekiant pagerinti optimizavimo modelio tikslumą gautas realias 4.13 ir 6.13 bandinių kokybės charakteristikų vertes rekomenduojama įtraukti į tinklo apmokymui skirtą duomenų rinkinį ir lazerinio pjovimo proceso optimizavimą atlikti dar kartą.

Apibendrinant galima daryti išvadą, kad dirbtiniu intelektu pagrįstų optimizavimo modelių naudojimas gali būti vienas iš efektyvių sprendimų siekiant pagerinti storesnių medžiagų apdirbimo „fiber“ tipo lazeriu kokybę. Dirbtinis neuroninis tinklas, apmokytas naudojant tyrimų metu surinktus kokybės charakteristikų duomenis esant skirtingiems pjovimo parametrų, gali padėti greitai nustatyti sudėtingus kokybės charakteristikų ir pjovimo parametrų ryšius bei efektyviau valdyti procesą.

3.6. Skyriaus apibendrinimas

Lazerinis pjovimas yra sudėtingas procesas, kurio kokybei įtakos gali turėti daug veiksnių. Vis dėlto, atlikti tyrimai patvirtina hipotezę, kad tinkamai parinkti lazerinio pjovimo parametrai gali padėti užtikrinti aukštą ne tik plonų, bet ir storesnių medžiagų apdirbimo kokybę pjovimui naudojant „fiber“ tipo lazerį. Remiantis gautais tyrimų rezultatais, akivaizdu, kad per daug sumažintos ar padidintos pagrindinių pjovimo parametrų (lazerio galios, pjovimo greičio, pagalbinių dujų slėgio) vertės gali turėti didelę įtaką pjovimo kokybei. Vis dėlto, galima pastebėti, kad mažas paviršiaus šiurkštumas ne visada užtikrina tikslius matmenis ar taisyklingą pjūvio geometriją. Dėl šios priežasties itin svarbu rasti pjovimo parametrų rinkinį, kurį naudojant būtų pasiekta optimali lazerinio pjovimo proceso kokybė. Šio uždavinio sprendimui panaudotas dirbtiniais neuroniniais tinklais pagrįstas optimizavimo modelis yra vienas iš pažangiausių metodų norint geriau suprasti procesą, analizuoti tyrimų metu gautus rezultatus, nustatyti ryšį tarp lazerinio pjovimo parametrų ir kokybės charakteristikų bei rasti tinkamus proceso parametrus.

4. Netradicinių apdirbimo technologijų taikymo socio-ekonominiai padariniai

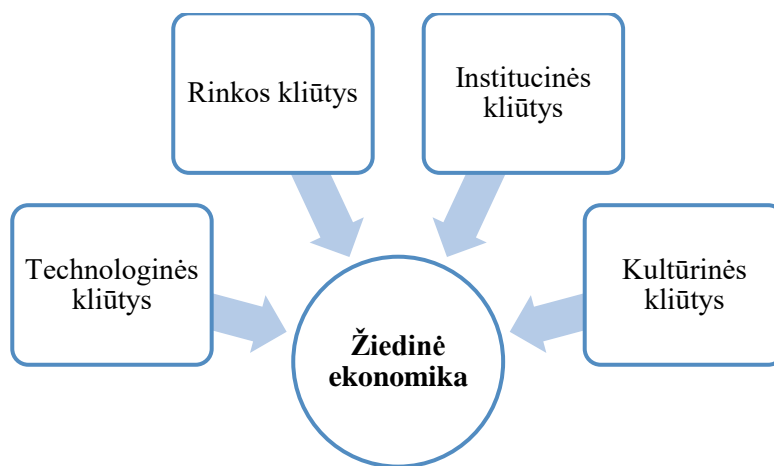
Nuolat augantis pasaulio gyventojų skaičius lemia vis spartesnę neatsinaujinančių išteklių vartojimą ir didesnę atliekų, išmetamų į aplinką, kiekį, kuris daro įtaką visuotiniam atšilimui bei taršai sausumoje bei vandens telkiniuose. Dėl šios priežasties vis dažniau atsižvelgiama į tvaresnę išteklių panaudojimą, atliekų perdirbimą. Vis dėlto, šiuo metu didžioji dalis įmonių veikia linijinės ekonomikos principu, kur produkto gyvavimo ciklas prasideda gamybinėse linijose ir baigiasi sąvartyne. Vykdamas tokį verslo modelį tik nedidelė dalis atliekų yra perdirbama. Dėl šios priežasties siekiant tausoti išteklius kuriami nauji verslo modeliai, pagrįsti žiedine ekonomika, kurios pagrindinis tikslas skatinti atliekų perdirbimą ir pakartotinį panaudojimą naujiems produktams gaminti [38].

Teigiama, kad gamybos sektorius suvartoja apie 25 % visos Europos elektros energijos [39], todėl galima teigti, kad ši sritis yra atsakinga ir už didelę dalį aplinkos taršos, kuri išskiriama į aplinką elektros energijos gamybos metu. Be to, vis augant gyventojų skaičiui numatomas didesnis produktų poreikis bei gamybos apimčių didėjimas, todėl svarbu pastebėti, kad ateityje gamybos sektoriaus poveikis aplinkai bus dar didesnis [39, 40]. Dėl šios priežasties šiuo metu vis didesnis dėmesys skiriamas tvariai gamybai, kurios pagrindinis tikslas yra susijęs su kuo efektyvesniu medžiagų ar kitų išteklių pavertimu galutiniais produktais naudojant aplinkai draugiškus procesus [41]. Svarbu paminėti, kad aplinkos taršą sukelia ne tik vykdomų gamybos procesų metu suvartojama elektros energija, tačiau ir įvairios atliekos, kurių neišvengiama siekiant pagaminti reikalingos formos detalę.

Kiekviena gamybos įmonė, vykdydama veiklą, siekia kuo greičiau ir kuo mažesniais medžiagų sąnaudomis pagaminti gaminį išlaikant aukštą jo kokybę. Vis dėlto, didėjantis aplinkosauginis sąmoningumas bei siekis įgyvendinti tvarios gamybos idėjas prie šių trijų pagrindinių tikslų prideda ir reikalavimą, kad gaminys būtų pagamintas sukeldamas kuo mažesnę poveikį aplinkai. Dėl vis griežtesnių aplinkosauginių reikalavimų, reglamentuojamų teisės aktais, ekologinių tikslų išskėlimas ir įgyvendinimas yra itin svarbus kiekvienai įmonei, todėl siekiant išlaikyti gaminamų produktų konkurencingumą rinkoje tokie tvarumo tikslai privalo būti įtraukti į įmonės veiklos strategiją [42].

Visgi, pusiausvyros tarp tvarumo ir įmonės asmeninių tikslų užtikrinimas vis dar yra iššūkis, kuris reikalauja pažangių sprendimų, tokių kaip daiktų internetas (angl. *Internet of Things – IoT*), mašininis mokymasis (angl. *machine learning*) ar dirbtinis intelektas, kurie gali būti panaudojami planuojant bei valdant gamybos procesus [43]. Visos šios inovatyvios technologijos siejamos su ketvirtąja pramonės revoliucija (Pramonė 4.0), kurios pagrindiniai tikslai yra automatizuoti gamybos procesus, sumažinti produktų gamybos sąnaudas. Be to, skaitmeninių technologijų, tokių kaip belaidis ryšys ir jutikliai, panaudojimas leidžia užtikrinti gamybos padalinių bei įrenginių tarpusavio komunikaciją. Toks žingsnis svarbus ir siekiant analizuoti procesą, anksčiau diagnozuoti galimus įrenginių gedimus ar rasti procesų spragas, kurias pašalinus būtų pagerintas gamybos efektyvumas [43, 44].

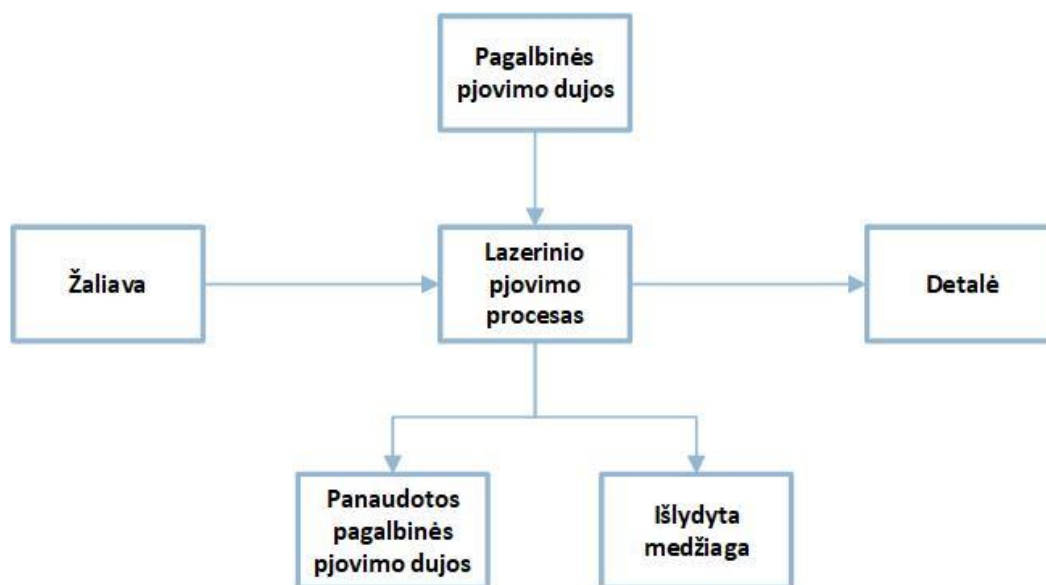
Svarbu paminėti, kad minėtų pažangių Pramonės 4.0 technologinių sprendimų taikymas gamybos įmonėse gali būti ir vienas iš būdų sumažinti aplinkos taršą bei įgyvendinti tvarios gamybos idėjas [45]. Kita vertus, pažangių sistemų įdiegimas ir naudojimas realioje gamybos aplinkoje vis dar yra sudėtingas procesas, nes norint, kad išmanios technologijos būtų efektyviai išnaudojamos jas būtina pritaikyti įvairiems technologiniams procesams bei kiekvienos įmonės poreikiams. Dėl šios priežasties teigiama, kad inovatyvių sistemų trūkumas bei sunkumai jas diegiant realioje gamybos aplinkoje šiuo metu yra viena iš žiedinės ekonomikos bei tvarios gamybos idėjų įgyvendinimo kliūčių (žr. 47 pav.) [46].



47 pav. Pagrindinės kliūtys žiedinės ekonomikos idėjoms įgyvendinti [46]

4.1. Netradicinių apdirbimo metodų taikymo poveikis aplinkai ir ekonomikai

Mechaniniam apdirbimui vis dar plačiai naudojami tradiciniai apdirbimo būdai – tekinimas, frezavimas, gręžimas ir kt. Visgi, svarbu paminėti, kad tokio apdirbimo metu susidaro didelis kiekis atliekų, tokių kaip birios metalo drožlės ar metalo drožlės, susimaišiusios su apdirbimo operacijų metu naudojamais aušinimo skysčiais [47]. Dėl vis didėjančio aplinkosauginio atsakingumo bei siekio sumažinti aplinkos taršą, kaip alternatyva įprastiems apdirbimo procesams, metalo apdirbimo pramonėje vis dažniau naudojami netradiciniai apdirbimo metodai (pvz., pjovimas abrazyvine vandens srove, lazerinis pjovimas, elektrocheminis apdirbimas ir kt.), kurie, lyginant su minėtais tradiciniais apdirbimo metodais, pasižymi platesnėmis panaudojimo galimybėmis bei didesniu našumu išlaikant tokį pat ar net aukštesnį apdirbimo tikslumą [47, 48]. Vis dėlto, nepaisant visų privalumų, vykdant netradicinio apdirbimo procesus nors ir sumažinamas poveikis aplinkai, tačiau šie apdirbimo metodai nėra visiškai tvarūs, nes jų metu neišvengiama toksiškų skysčių, dujų susidarymo, kurie daro neigiamą poveikį aplinkai [48]. Nagrinėjant lazerinio pjovimo proceso srauto diagramą (žr. 48 pav.), galima pastebėti, kad proceso vykdymui būtina žaliava bei pagalbinės pjovimo dujos. Proceso išvesties elementai yra galutinė pagaminta detalė bei atliekos – išlydyta medžiaga bei panaudotos dujos [47].



48 pav. Lazerinio pjovimo proceso srauto diagrama [47]

Svarbu paminėti, kad atliekant netradicines mechaninio apdirbimo operacijas suvartojama kur kas daugiau elektros energijos nei vykdant tradicines mechaninio apdirbimo operacijas [40]. Visgi, analizuojant lazerinio pjovimo procesą buvo nustatyta, kad įrenginio ekonominis efektyvumas ir suvartojamas energijos kiekis priklauso ir nuo naudojamo lazerinio pjovimo įrenginio tipo.

Analizuojant 13 lentelėje pateiktus duomenis galima teigti, kad „fiber“ tipo lazerio energijos poreikis yra apie 2 kartus mažesnis nei CO₂ tipo lazerio [39]. Taigi, akivaizdu, kad „fiber“ tipo lazerio naudojimas gamybos procese suteikia ne tik geresnį matmenų tikslumą, apdirbimo našumą, platesnes įvairių medžiagų apdirbimo galimybes, tačiau ir reikalauja mažiau elektros energijos, todėl siekiant kurti tvaresnę gamybos aplinką rekomenduojama naudoti šio tipo lazerius.

13 lentelė. CO₂ ir „fiber“ tipo lazerių ekonominis efektyvumas [39]

	CO ₂		„Fiber“
Įrenginio galia	2,5 kW	4 kW	2 kW
Reikalinga energijos šaltinio galia	22,7 kW	41,1 kW	7,8 kW
Energijos panaudojimo efektyvumas	11 %	9,7 %	25,6 %

Kita vertus, kaip buvo minėta, „fiber“ tipo lazeriai yra itin efektyvūs norint apdirbti plonas medžiagas, tačiau kai medžiagos storis didesnis nei 4 mm apdirbimo kokybė itin suprastėja, todėl norint tokių medžiagų apdirbimui naudoti šio tipo lazerius dar didesnis dėmesys turi būti skiriamas pjovimo proceso įvesties parametrams. Vis dėlto, dažnai šie parametrai parenkami bandymų ir klaidų keliu, tačiau toks metodas nėra efektyvus, nes tokiu būdu išauga operatoriaus laiko bei medžiagų sąnaudos, o optimali pjovimo kokybė vis tiek gali būti nepasiekta [49].

4.2. Skyriaus apibendrinimas

Atliktas „fiber“ tipo lazeriu apdirbamų storesnių plieno lakštų kokybės tyrimas ir pagrindinių pjovimo parametrų optimizavimas praplečia „fiber“ tipo lazerių panaudojimo galimybes. Tai leidžia sutaupyti vietą įmonių gamybinėse patalpose, nes tiek plonesnių, tiek storesnių medžiagų apdirbimui galima naudoti tą patį lazerinio pjovimo įrenginį. Jeigu gamybinė įranga yra universaliai išnaudojama, gamybinės patalpų plotas gali būti mažesnis, todėl sumažinamos patalpų priežiūros bei išlaikymo išlaidos. Be to, „fiber“ tipo lazerio veikimui reikalingas kur kas mažesnis energijos kiekis, todėl storesnių metalo lakštų apdirbimo kokybės problemų sprendimas gali būti vienas iš žingsnių siekiant sumažinti aplinkos taršą. Be to, lazerinio pjovimo kokybės gerinimas bei gaminių ilgaamžiškumo užtikrinimas gali prailginti ir gaminių eksploatavimo laiką, sumažinti naujų gaminių gamybos poreikį ir aplinkos taršą, kuri neišvengiama jų gamybos metu. Taigi, lazerinio pjovimo kokybės gerinimas gali padėti įgyvendinti žiedinės ekonomikos idėjas kuriant tvaresnę gamybos aplinką.

Išvados

1. Atlikus pjūvio paviršiaus šiurkštumo matavimus buvo nustatyta, kad paviršiaus kokybei įtakos turi lazerio galia, pjovimo greitis, pagalbinių dujų slėgis. Padidinus lazerio galią (nuo 2,8 kW iki 4 kW) 4 mm storio bandinių vidutinis paviršiaus šiurkštumas (R_a) sumažėjo 0,653 μm , o padidinus pjovimo greitį (nuo 2900 mm/min iki 4500 mm/min) – 0,765 μm . Priešinga tendencija nustatyta vertinant pagalbinių pjovimo dujų slėgio įtaką, nes slėgiui didėjant nuo 0,3 bar iki 1,5 bar pjūvio paviršiaus šiurkštumas taip pat išaugo nuo 1,264 μm iki 2,979 μm . Analizuojant 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo rezultatus nustatyta tokia pati pjovimo parametru įtaka bandinių pjūvio paviršiaus šiurkštumui, tačiau lyginant panašiais parametrais išpjautus skirtingo storio bandinius nustatyta, kad 6 mm storio bandinio gautas paviršiaus šiurkštumas yra 0,237 μm mažesnis nei 4 mm storio bandinio.
2. Vertinant bandinių tikslumą mažiausia vidutinė matmenų nuokrypa nuo nominaliųjų matmenų pjaunant 4 mm storio plieno lakštą nustatyta 0,225 mm, o 6 mm storiui – 0,096 mm, todėl tikslumui didelę įtaką turi pjaunamos medžiagos storis – kuo storis didesnis, tuo nuokrypa nuo nustatytų nominaliųjų matmenų mažesnė. Išanalizavus nagrinėtų pjovimo parametru poveikį tikslumui nustatyta, kad pjovimo tikslumą labiausiai lemia lazerio galia, kuriai didėjant nuo 2,8 kW iki 4 kW 4 mm storio bandinių vidutinė matmenų nuokrypa padidėjo 0,086 mm, o 6 mm – 0,059 mm (kai galia didėjo nuo 3 kW iki 4 kW). Reikšmingo kitų pjovimo parametru (pjovimo greičio bei pagalbinių dujų slėgio) poveikio matmenų tikslumui nenustatyta.
3. Vertinant lazerio pjūvio geometrijos taisyklingumą nustatyta, kad lazerio pjūvis pasižymi kūgiškumu – plėtėja apatinio pjūvio paviršiaus link. Didėjant apdirbamos medžiagos storiui vidutinis bandinių pjūvio kūgiškumas taip pat padidėja nuo 0,056 mm (kai storis 4 mm) iki 0,199 mm (kai storis 6 mm). Analizuojant pjovimo parametru įtaką abiejų nagrinėjamų storių bandinių pjūvio kūgiškumui pastebėta, kad šiai kokybės charakteristikai didžiausią įtaką turi lazerio galia ir pjovimo greitis. Pavyzdžiui, apdirbant 4 mm storio lakštą lazerio galiai didėjant nuo 2,8 kW iki 4 kW pjūvio kūgiškumas sumažėjo nuo 0,074 mm iki 0,041 mm, tačiau išaugo nuo 0,027 mm iki 0,104 mm, kai buvo didinamas pjovimo greitis (nuo 2900 mm/min iki 4500 mm/min). Pagalbinių dujų slėgio įtaka pjūvio kūgiškumui nėra žymi, tačiau matomas pjūvio kūgiškumo didėjimas, kai pagalbinių dujų slėgis yra ypač didelis – esant 4 bar pagalbinių dujų slėgiui 6 mm storio bandinio kūgiškumas išaugo iki 0,337 mm.
4. Vertinant lazerio terminį poveikį pjaunamai medžiagai nustatyta, kad šis poveikis didėja apatinio bandinio paviršiaus link bei priklauso nuo pjaunamos medžiagos storio. 4 mm storio bandinių terminio poveikio zonos dydis kinta nuo 26,281 μm iki 39,835 μm , o temperatūros poveikis 6 mm storio bandiniams yra apie 6 kartus didesnis – terminio poveikio zonos dydis kinta nuo 155,441 μm iki 230,779 μm .
5. Naudojant sukurta lazerinio pjovimo kokybės charakteristikų optimizavimo modelį, pagrįstą dirbtiniais neuroniniais tinklais, apskaičiuoti pjovimo parametrai, kuriuos naudojant pjovimo kokybė būtų optimali. Nustatyta, kad 4 mm storio lakšto pjovimui rekomenduojama naudoti 3 kW lazerio galią, 2900 mm/min pjovimo greitį ir pagalbinių deguonies dujų slėgį 0,4 bar. Taip pat nustatyta, kad optimali pjovimo kokybė apdirbant 6 mm storio lakštą bus gauta, kai lazerio galia lygi 3,9 kW, pjovimo greitis lygus 3240 mm/min, pagalbinių dujų slėgis – 0,55 bar.
6. „Fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybės gerinimas apdirbant storesnes medžiagas gali praplėsti šio tipo įrenginių panaudojimo galimybes. Universalus įrenginių išnaudojimas gali būti vienas iš būdų norint sumažinti reikalingą gamybinių patalpų plotą bei jų aptarnavimo išlaidas. Be to,

„fiber“ tipo lazerio elektros energijos poreikis yra apie 2 kartus mažesnis nei CO₂ tipo lazerio, todėl dar platesnis šio tipo lazerių naudojimas gali padėti įgyvendinti tvarios gamybos tikslus.

Rekomendacijos tolimesniems tyrimams

1. Atlikti terminio poveikio ir temperatūros nepaveiktos metalo lydinio zonų kietumo matavimus.
2. Ištirti pjaunamos medžiagos įtaką „fiber“ tipo lazerio pjovimo kokybei pjovimui naudojant nerūdijančio plieno ar aliuminio lydinius.
3. Ištirti kitų lazerinio pjovimo įvesties parametrų (fokusavimo atstumo, lazerio antgalio atstumo iki ruošinio) įtaką „fiber“ tipo lazerio kokybei.
4. Tikslinti lazerinio pjovimo proceso optimizavimo modelį dirbtinio neuroninio tinklo apmokymui naudojant daugiau duomenų.

Literatūros sąrašas

1. SUREBAN, R.; KULKARNI, V. N. ir GAITONDE, V. N. Modern Optimization Techniques for Advanced Machining Processes - A Review. *Materials Today-Proceedings*, 2019, vol. 18. pp. 3034-3042. ISSN 2214-7853.
2. BALAMURUGAN, E.; FLAIH, L. R.; YUVARAJ, D.; SANGEETHA, K.; JAYANTHILADEVI, A. ir kiti. Use Case of Artificial Intelligence in Machine Learning Manufacturing 4.0. *Proceedings of 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (Iccike' 2019)*, 2019. pp. 657-660. ISSN 978-1-7281-3778-0.
3. KALITA, K.; CHAKRABORTY, S.; GHADAI, R. K. ir CHAKRABORTY, S. Parametric Optimization of Non-Traditional Machining Processes using Multi-Criteria Decision Making Techniques: Literature Review and Future Directions. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling Experiments and Design*, MAR, 2023, vol. 6, no. 1. pp. 1-40. ISSN 2520-8160.
4. ULLAH, S.; LI, X.; GUO, G.; RIVEIRO RODRÍGUEZ, A.; LI, D. ir kiti. Influence of the Fiber Laser Cutting Parameters on the Mechanical Properties and Cut-edge Microfeatures of a AA2B06-T4 Aluminum Alloy. *Optics & Laser Technology*, 2022, vol. 156. pp. 108395. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0030399222005527>. ISSN 0030-3992.
5. SANTOLINI, G.; ROTA, P.; GANDOLFI, D. ir BOSETTI, P. Cut Quality Estimation in Industrial Laser Cutting Machines: A Machine Learning Approach. *2019 Ieee/Cvf Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (Cvprw 2019)*, 2019. pp. 389-397. ISSN 2160-7508; 978-1-7281-2506-0.
6. Naresh; ir KHATAK, P. Laser Cutting Technique: A Literature Review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 56. pp. 2484-2489. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S2214785321056947>. ISSN 2214-7853.
7. MUANGPOOL, T.; ir PULLTEAP, S. Reviews on Laser Cutting Technology for Industrial Applications. *Third International Conference on Photonics Solutions (Icps2017)*, 2018, vol. 10714. pp. UNSP 107140Q. ISSN 0277-786X; 978-1-5106-1995-1.
8. SOŁTYSIAK, R.; WASILEWSKI, P.; SOŁTYSIAK, A.; TROSZYŃSKI, A. ir MAĆKOWIAK, P. The Analysis of Fiber and CO2 Laser Cutting Accuracy. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 290. pp. 03016. Prieiga per: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/39/mateconf_mse2019_03016/mateconf_mse2019_03016.html. ISSN 2261-236X.
9. RIVEIRO, A.; QUINTERO, F.; BOUTINGUIZA, M.; DEL VAL, J.; COMESANA, R. ir kiti. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, JAN 1, 2019, vol. 12, no. 1. pp. 157.
10. BOHDAL, L.; ir SCHMIDTKE, D. Effect of Fiber and CO2 Lasers Parameters on the Cut Surface Quality of RVS 1.4301 Stainless Steel. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, JUN, 2022, vol. 16, no. 2. pp. 8862-8872. ISSN 2289-4659.
11. LIAO, Z.; LA MONACA, A.; MURRAY, J.; SPEIDEL, A.; USHMAEV, D. ir kiti. Surface Integrity in Metal Machining - Part I: Fundamentals of Surface Characteristics and Formation Mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 162. pp. 103687. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0890695520307021>. ISSN 0890-6955.

12. SATERNUS, Z.; KUBIAK, M.; PIEKARSKA, W. ir DOMANSKI, T. Analysis of Hardening Area of Material with Variable Parameters of Laser Beam Cutting. *Acta Physica Polonica A*, JUL, 2022, vol. 142, no. 1. pp. 97-100. ISSN 0587-4246.
13. *Fiber Laser Vs Plasma: 5 Things to Consider before You Invest*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://espritautomation.com/laser-vs-plasma/> [žiūrėta 2023-09-20].
14. SETHI, A.; ir DAS, A. Fiber Laser Processing of GFRP Composites and Multi-Objective Optimization of the Process using Response Surface Methodology. *Journal of Composite Materials*, October 12, 2018, vol. 53.
15. LA MONACA, A.; MURRAY, J. W.; LIAO, Z.; SPEIDEL, A.; ROBLES-LINARES, J. A. ir kiti. Surface Integrity in Metal Machining - Part II: Functional Performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 164. pp. 103718. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0890695521000298>. ISSN 0890-6955.
16. KRAJEWSKI, S.J.; GROCHALA, D.; TOMKOW, J. ir GRZEJDA, R. Analysis of the Surface Stereometry of Alloyed Austenitic Steel After Fibre Laser Cutting using Confocal Microscopy. *Coatings*, JAN, 2023, vol. 13, no. 1. pp. 15.
17. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Thermal Cutting — Classification of Thermal Cuts — Geometrical Product Specification and Quality Tolerances (ISO 9013:2017)* 2017-02-01 ed. Lietuvos standartizacijos departamentas.
18. Prima Power. *PLATINO FIBER Naudotojo Vadovas. Išversta originali naudojimo instrukcija*. Prima Power, January 27, 2020.
19. *How to Choose the Right Nozzle for Your Laser Cutting Machine - News - Jinan Acme CNC Equipment Co.,Ltd*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://www.acme-laser.com/news/how-to-choose-the-right-nozzle-for-your-laser-53302782.html> [žiūrėta 2023-09-21].
20. TEAM, T. G. *Melting Point and some Physical Properties of Materials*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://techgogger.com/automation/melting-point-and-some-physical-properties-of-materials/> [žiūrėta 2023-09-18].
21. LIU, Y.; ZHANG, S.; ZHAO, Y. ir REN, Z. Experiments on the Kerf Quality Characteristic of Mild Steel while Cutting with a High-Power Fiber Laser. *Optics & Laser Technology*, 2022, vol. 154. pp. 108332. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0030399222004893>. ISSN 0030-3992.
22. GENNA, S.; MENNA, E.; RUBINO, G. ir TAGLIAFERRI, V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Applied Sciences-Basel*, JUL, 2020, vol. 10, no. 14. pp. 4956.
23. BOUJELBENE, M.; ALGHAMDI, A.; MIRAOUI, I.; BAYRAKTAR, E. ir GAZBAR, M. Effects of the Laser Cutting Parameters on the Micro-Hardness and on the Heat Affected Zone of the Mi-Hardened Steel. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, May 1, 2017, vol. 4. pp. 19-25.
24. CAVUSOGLU, O. The 3D Surface Morphological Investigation of Laser Cutting Process of 2024-T3 Aluminum Alloy Sheet. *Optik*, 2021, vol. 238. pp. 166739. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S003040262100454X>. ISSN 0030-4026.
25. AMARAL, I.; SILVA, F. J. G.; PINTO, G. F. L.; CAMPILHO, R. D. S. G. ir GOUVEIA, R. M. Improving the Cut Surface Quality by Optimizing Parameters in the Fibre Laser Cutting Process. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38. pp. 1111-1120. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S2351978920302006>. ISSN 2351-9789.
26. FISCHER, Ulrich, et al. *Mechanikos Inžinieriaus Žinynas*. Vilnius: Lietuvos inžinerinės pramonės asociacija LINPRA, 2014. ISBN 9786090210765.

27. VELLING, Andreas. *Structural Steels S235, S275, S355, S420 and their Properties*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://www.fractory.com/structural-steels-s235-s275-s355-s420-and-their-properties/> [žiūrėta 2023-09-24].
28. *Platino Fiber / Prima Power*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://www.primapower.com/en/technologies/2d-laser-cutting/2d-laser-cutting-machines/platino-fiber> [žiūrėta 2023-09-24].
29. GIRDU, C.C.; MIHAIL, L. A. ir DRAGOI, M. V. Estimation of Laser Cutting Process Efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, October 1, 2019, vol. 659, no. 1. pp. 012045. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012045>. ISSN 1757-899X.
30. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface Texture: Profile Method -- Terms, Definitions and Surface Texture Parameters (ISO 4287:1997)*. 1997-04-03 ed. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS.
31. MADIC, M.; MARINKOVIC, V. ir RADOVANOVIC, M. Optimization of the Kerf Quality Characteristics in CO2 Laser Cutting of AISI 304 Stainless Steel Based on Taguchi Method. *Mechanika*, 2013, no. 5. pp. 580-587. ISSN 1392-1207.
32. *Mitutoyo - CRYSTA-Apex V9106 CNC CMM*. Internetinis puslapis. Prieiga per: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-569/datasheet.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/191-569/datasheet.xhtml) [žiūrėta 2023-10-30].
33. *LAM PLAN® Polissage Et Abrasifs Diamant - Polishing Machine SMARTLAM®2.0*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://www.lamplan.com/en/metallography/prepolishing-polishing/prepolishing-polishing-machines/polishing-machine-smartlam%C2%AE2-0.html> [žiūrėta 2023-11-20].
34. *ZEISS Axioscope for Materials*. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/light-microscopes/widefield-microscopes/axioscope-for-materials.html> [žiūrėta 2023-11-20].
35. VAGHEESAN, S.; ir GOVINDARAJALU, J. Hybrid Neural Network-Particle Swarm Optimization Algorithm and Neural Network-Genetic Algorithm for the Optimization of Quality Characteristics during CO2 Laser Cutting of Aluminium Alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, AUG, 2019, vol. 41, no. 8. pp. 328. ISSN 1678-5878.
36. BAKHTIYARI, A.N.; WANG, Z.; WANG, L. ir ZHENG, H. A Review on Applications of Artificial Intelligence in Modeling and Optimization of Laser Beam Machining. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 135. pp. 106721. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0030399220313542>. ISSN 0030-3992.
37. STELZER, S.; A.Mahrle; WETZIG, A. ir BEYER, E. Experimental Investigations on Fusion Cutting Stainless Steel with Fiber and CO2 Laser Beams. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41. pp. 399-404. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S1875389213001077>. ISSN 1875-3892.
38. HOFFMAN, M.; SCHENCK, C. J. ir HERBST, F. Exploring the Intersection Where Business Models, a Circular Economy and Sustainability Meet in the Waste Economy: A Scoping Review. *Sustainability*, MAR, 2022, vol. 14, no. 6. pp. 3687.
39. KELLENS, K.; COSTA RODRIGUES, G.; DEWULF, W. ir DUFLOU, J. Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *Physics Procedia*, December 31, 2014, vol. 56. pp. 854-864.
40. GAMAGE, J.R.; ir DESILVA, A. K. M. Assessment of Research Needs for Sustainability of Unconventional Machining Processes. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Emerging Potentials*, 2015, vol. 26. pp. 385-390. ISSN 2212-8271.

41. DE ALWIS, A.M.L.; DE SILVA, N. Ir SAMARANAYAKE, P. Industry 4.0-Enabled Sustainable Manufacturing: Current Practices, Barriers and Strategies. *Benchmarking-an International Journal*, 2023. ISSN 1463-5771.
42. REIFF, C.; BUSER, M.; BETTEN, T.; ONUSEIT, V.; HOSSFELD, M. ir kiti. A Process-Planning Framework for Sustainable Manufacturing. *Energies*, SEP, 2021, vol. 14, no. 18. pp. 5811.
43. JAVAID, M.; HALEEM, A.; PRATAP SINGH, R.; KHAN, S. ir SUMAN, R. Sustainability 4.0 and its Applications in the Field of Manufacturing. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2022, vol. 2. pp. 82-90. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667345222000177>. ISSN 2667-3452.
44. AWAN, U.; SROUFE, R. ir SHAHBAZ, M. Industry 4.0 and the Circular Economy: A Literature Review and Recommendations for Future Research. *Business Strategy and the Environment*, MAY, 2021, vol. 30, no. 4. pp. 2038-2060. ISSN 0964-4733.
45. BAI, C.; DALLASEGA, P.; ORZES, G. ir SARKIS, J. Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective. *International Journal of Production Economics*, 2020, vol. 229. pp. 107776. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320301559>. ISSN 0925-5273.
46. GRAFSTRÖM, J.; ir AASMA, S. Breaking Circular Economy Barriers. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 292. pp. 126002. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0959652621002225>. ISSN 0959-6526.
47. ÖZTÜRK, E.G.; ir AYTURAN, Z. C. Life Cycle Impact Assessment and Economic Evaluation of Material Cutting Technologies. *Technologies, Markets and Policies: Bringing Together Economics and Engineering*, 2022.
48. GUPTA, K.; ir GUPTA, M. K. Developments in Nonconventional Machining for Sustainable Production: A State-of-the-Art Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, JUN, 2019, vol. 233, no. 12. pp. 4213-4232. ISSN 0954-4062.
49. MADIC, M.; RADOVANOVIC, M.; MANIC, M. ir TRAJANOVIC, M. Optimization of ANN Models using Different Optimization Methods for Improving CO2 Laser Cut Quality Characteristics. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, JAN, 2014, vol. 36, no. 1. pp. 91-99. ISSN 1678-5878.

Priedai

1 priedas. 4 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai

Bandinio numeris	Bandinio kraštinė, mm	Ra, μm	Ra, μm	Rz, μm	Rz, μm	Rz1 max, μm	Rz1 max, μm
4.01	100	1,577	1,426	7,534	6,809	8,971	9,069
	80	1,274		6,083		9,166	
4.02	100	1,497	1,353	7,18	6,964	9,207	9,504
	80	1,208		6,747		9,8	
4.03	100	1,398	1,431	7,063	7,461	8,195	9,472
	80	1,464		7,859		10,748	
4.04	100	1,844	2,006	8,365	8,559	10,447	11,208
	80	2,168		8,752		11,969	
4.05	100	1,311	1,478	7,362	7,204	8,965	8,588
	80	1,645		7,046		8,210	
4.06	100	1,431	1,466	7,187	7,362	8,845	9,411
	80	1,501		7,536		9,977	
4.07	100	1,314	1,267	6,442	6,232	8,206	7,392
	80	1,219		6,022		6,578	
4.08	100	2,398	2,032	14,568	11,240	18,740	13,602
	80	1,665		7,912		8,464	
4.09	100	1,081	1,264	5,626	6,062	6,416	7,345
	80	1,446		6,498		8,274	
4.10	100	Neišpjautas					
	80						
4.11	100	2,715	2,647	14,386	13,976	18,346	16,571
	80	2,579		13,566		14,795	
4.12	100	2,320	2,979	14,600	15,720	17,039	17,668
	80	3,638		16,840		18,297	
4.13	100	1,726	1,609	8,889	8,433	11,258	10,943
	80	1,491		7,977		10,628	

2 priedas. 6 mm storio bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai

Bandinio numeris	Bandinio kraštinė, mm	Ra, μm	Ra vid, μm	Rz, μm	Rz vid, μm	Rz1 max vid, μm	Rz1 max vid, μm
6.01	100	1,203	1,324	6,654	6,926	8,303	8,62
	80	1,445		7,197		8,937	
6.02	100	1,339	1,448	6,892	7,232	9,654	9,804
	80	1,557		7,571		9,953	
6.03	100	1,765	1,668	8,923	8,866	9,964	11,088
	80	1,571		8,808		12,212	
6.04	100	Neišpjautas					
	80						
6.05	100	0,840	1,154	4,644	6,081	8,103	8,5495
	80	1,468		7,517		8,996	
6.06	100	Neišpjautas					
	80						
6.07	100	1,025	1,116	4,796	5,171	5,543	7,181
	80	1,206		5,546		8,819	
6.08	100	2,686	2,925	13,792	14,981	16,783	18,483
	80	3,163		16,170		20,183	
6.09	100	4,815	4,399	27,115	26,473	36,935	34,551
	80	3,982		25,831		32,166	
6.10	100	7,393	7,010	36,907	35,880	43,859	46,343
	80	6,626		34,852		48,827	
6.11	100	8,164	8,243	29,995	38,776	46,957	48,936
	80	8,322		47,556		50,914	
6.12	100	3,438	4,367	16,436	22,058	19,293	26,772
	80	5,295		27,680		34,251	
6.13	100	2,141	1,930	10,493	9,869	11,411	11,559
	80	1,719		9,244		11,706	

3 priedas. 4 mm storio bandinių matmenų matavimo rezultatai

Bandinio numeris	Matmens numeris	Nominalus matmuo, mm	Išmatuotas matmuo (viršus), mm	Skirtumas (viršus), mm	Išmatuotas matmuo (apačia), mm	Skirtumas (apačia), mm	Matavimo vidurkis, mm	Skirtumo vidurkio modulis, mm	Tolerancija (pagal ISO 9013:2017)	VP-AP, mm	VP-AP , mm	Pjūvio platėjimo kampas, °
4.01	M1	100	99,614	0,386	99,563	0,437	99,589	0,411	0,25	0,051	0,051	0,37
	M2	80	79,614	0,386	79,566	0,434	79,590	0,410	0,25	0,048	0,048	0,34
	M3	59	58,681	0,319	58,615	0,385	58,648	0,352	0,25	0,066	0,066	0,47
	M4	25,8	25,394	0,406	25,350	0,450	25,372	0,428	0,25	0,044	0,044	0,32
	M5	70	70,307	0,307	70,351	0,351	70,329	0,329	0,25	-0,044	0,044	0,32
	M6	22	22,336	0,336	22,392	0,392	22,364	0,364	0,25	-0,056	0,056	0,40
	M7	15	14,649	0,351	14,571	0,429	14,610	0,390	0,25	0,078	0,078	0,56
	M8	5,5	5,856	0,356	5,902	0,402	5,879	0,379	0,2	-0,046	0,046	0,33
	M9	4,6	4,377	0,223	4,333	0,267	4,355	0,245	0,2	0,044	0,044	0,32
	M10	28,3	28,463	0,163	28,498	0,198	28,481	0,180	0,25	-0,035	0,035	0,25
	M11	4,3	4,475	0,175	4,521	0,221	4,498	0,198	0,2	-0,046	0,046	0,33
	M12	6,2	6,253	0,053	6,296	0,096	6,275	0,074	0,2	-0,043	0,043	0,31
	M13	8,2	8,270	0,070	8,303	0,103	8,287	0,087	0,2	-0,033	0,033	0,24
	M14	6	6,066	0,066	6,097	0,097	6,081	0,081	0,2	-0,032	0,032	0,23
	M15	19	19,065	0,065	19,107	0,107	19,086	0,086	0,25	-0,042	0,042	0,30
4.02	M1	100	99,569	0,431	99,509	0,491	99,539	0,461	0,25	0,060	0,060	0,43
	M2	80	79,593	0,407	79,558	0,442	79,576	0,424	0,25	0,035	0,035	0,25
	M3	59	58,660	0,340	58,574	0,426	58,617	0,383	0,25	0,086	0,086	0,62
	M4	25,8	25,357	0,443	25,323	0,477	25,340	0,460	0,25	0,034	0,034	0,24
	M5	70	70,333	0,333	70,372	0,372	70,353	0,352	0,25	-0,039	0,039	0,28
	M6	22	22,381	0,381	22,418	0,418	22,400	0,400	0,25	-0,037	0,037	0,27

	M7	15	14,611	0,389	14,565	0,435	14,588	0,412	0,25	0,046	0,046	0,33
	M8	5,5	5,882	0,382	5,937	0,437	5,909	0,409	0,2	-0,055	0,055	0,39
	M9	4,6	4,343	0,257	4,291	0,309	4,317	0,283	0,2	0,051	0,051	0,37
	M10	28,3	28,501	0,201	28,532	0,232	28,517	0,217	0,25	-0,031	0,031	0,22
	M11	4,3	4,570	0,270	4,572	0,272	4,571	0,271	0,2	-0,002	0,002	0,01
	M12	6,2	6,264	0,064	6,313	0,113	6,289	0,088	0,2	-0,049	0,049	0,35
	M13	8,2	8,261	0,061	8,298	0,098	8,280	0,079	0,2	-0,037	0,037	0,27
	M14	6	6,083	0,082	6,120	0,120	6,101	0,101	0,2	-0,038	0,038	0,27
	M15	19	19,097	0,097	19,109	0,109	19,103	0,103	0,25	-0,012	0,012	0,09
4.03	M1	100	99,673	0,327	99,594	0,406	99,634	0,367	0,25	0,079	0,079	0,57
	M2	80	79,660	0,340	79,592	0,408	79,626	0,374	0,25	0,068	0,068	0,49
	M3	59	58,703	0,297	58,623	0,377	58,663	0,337	0,25	0,080	0,080	0,57
	M4	25,8	25,432	0,368	25,360	0,440	25,396	0,404	0,25	0,072	0,072	0,52
	M5	70	70,262	0,262	70,330	0,330	70,296	0,296	0,25	-0,068	0,068	0,49
	M6	22	22,315	0,315	22,384	0,384	22,350	0,349	0,25	-0,069	0,069	0,49
	M7	15	14,696	0,304	14,636	0,364	14,666	0,334	0,25	0,060	0,060	0,43
	M8	5,5	5,856	0,356	5,883	0,383	5,870	0,370	0,2	-0,027	0,027	0,19
	M9	4,6	4,394	0,206	4,348	0,252	4,371	0,229	0,2	0,046	0,046	0,33
	M10	28,3	28,502	0,202	28,553	0,253	28,528	0,227	0,25	-0,051	0,051	0,37
	M11	4,3	4,489	0,189	4,499	0,199	4,494	0,194	0,2	-0,010	0,010	0,07
	M12	6,2	6,258	0,058	6,262	0,062	6,260	0,060	0,2	-0,004	0,004	0,03
	M13	8,2	8,265	0,065	8,295	0,095	8,280	0,080	0,2	-0,030	0,030	0,21
	M14	6	6,093	0,093	6,117	0,117	6,105	0,105	0,2	-0,024	0,024	0,17
	M15	19	19,047	0,047	19,029	0,029	19,038	0,038	0,25	0,018	0,018	0,13
4.04	M1	100	99,678	0,322	99,655	0,345	99,667	0,334	0,25	0,023	0,023	0,16
	M2	80	79,666	0,334	79,614	0,386	79,640	0,360	0,25	0,052	0,052	0,37

	M3	59	58,664	0,336	58,706	0,294	58,685	0,315	0,25	-0,042	0,042	0,30
	M4	25,8								0,000	0,000	0,00
	M5	70	70,229	0,229	70,271	0,271	70,250	0,250	0,25	-0,042	0,042	0,30
	M6	22	22,245	0,245	22,317	0,317	22,281	0,281	0,25	-0,072	0,072	0,52
	M7	15	14,605	0,395	14,801	0,199	14,703	0,297	0,25	-0,196	0,196	1,40
	M8	5,5	5,757	0,257	5,688	0,188	5,723	0,223	0,2	0,069	0,069	0,49
	M9	4,6	4,409	0,191	4,532	0,068	4,471	0,130	0,2	-0,123	0,123	0,88
	M10	28,3	28,497	0,197	28,531	0,231	28,514	0,214	0,25	-0,034	0,034	0,24
	M11	4,3	4,451	0,151	4,578	0,278	4,515	0,215	0,2	-0,127	0,127	0,91
	M12	6,2	6,308	0,108	6,276	0,076	6,292	0,092	0,2	0,032	0,032	0,23
	M13	8,2	8,280	0,080	8,414	0,214	8,347	0,147	0,2	-0,134	0,134	0,96
	M14	6	6,103	0,103	6,175	0,175	6,139	0,139	0,2	-0,072	0,072	0,52
	M15	19	19,104	0,104	19,192	0,192	19,148	0,148	0,25	-0,088	0,088	0,63
4.05	M1	100	99,577	0,423	99,545	0,455	99,561	0,439	0,25	0,032	0,032	0,23
	M2	80	79,565	0,435	79,527	0,473	79,546	0,454	0,25	0,038	0,038	0,27
	M3	59	58,641	0,359	58,580	0,420	58,611	0,389	0,25	0,061	0,061	0,44
	M4	25,8	25,358	0,442	25,296	0,504	25,327	0,473	0,25	0,062	0,062	0,44
	M5	70	70,315	0,315	70,373	0,373	70,344	0,344	0,25	-0,058	0,058	0,42
	M6	22	22,374	0,374	22,437	0,437	22,406	0,406	0,25	-0,063	0,063	0,45
	M7	15	14,613	0,387	14,579	0,421	14,596	0,404	0,25	0,034	0,034	0,24
	M8	5,5	5,881	0,381	5,923	0,423	5,902	0,402	0,2	-0,042	0,042	0,30
	M9	4,6	4,359	0,241	4,352	0,248	4,356	0,244	0,2	0,007	0,007	0,05
	M10	28,3	28,496	0,196	28,524	0,224	28,510	0,210	0,25	-0,028	0,028	0,20
	M11	4,3	4,554	0,254	4,578	0,278	4,566	0,266	0,2	-0,024	0,024	0,17
	M12	6,2	6,253	0,053	6,311	0,111	6,282	0,082	0,2	-0,058	0,058	0,42
	M13	8,2	8,291	0,091	8,367	0,167	8,329	0,129	0,2	-0,076	0,076	0,54

	M14	6	6,087	0,087	6,107	0,107	6,097	0,097	0,2	-0,020	0,020	0,14
	M15	19	19,055	0,055	19,038	0,038	19,047	0,047	0,25	0,017	0,017	0,12
4.06	M1	100	99,642	0,358	99,569	0,431	99,606	0,394	0,25	0,073	0,073	0,52
	M2	80	79,589	0,411	79,512	0,488	79,551	0,450	0,25	0,077	0,077	0,55
	M3	59	58,680	0,320	58,592	0,408	58,636	0,364	0,25	0,088	0,088	0,63
	M4	25,8	25,431	0,369	25,325	0,475	25,378	0,422	0,25	0,106	0,106	0,76
	M5	70	70,285	0,285	70,367	0,367	70,326	0,326	0,25	-0,082	0,082	0,59
	M6	22	22,349	0,349	22,449	0,449	22,399	0,399	0,25	-0,100	0,100	0,72
	M7	15	14,671	0,329	14,601	0,399	14,636	0,364	0,25	0,070	0,070	0,50
	M8	5,5	5,835	0,335	5,905	0,405	5,870	0,370	0,2	-0,070	0,070	0,50
	M9	4,6	4,397	0,203	4,363	0,237	4,380	0,220	0,2	0,034	0,034	0,24
	M10	28,3	28,471	0,171	28,497	0,197	28,484	0,184	0,25	-0,026	0,026	0,19
	M11	4,3	4,540	0,240	4,554	0,254	4,547	0,247	0,2	-0,014	0,014	0,10
	M12	6,2	6,215	0,015	6,271	0,071	6,243	0,043	0,2	-0,056	0,056	0,40
	M13	8,2	8,275	0,075	8,310	0,110	8,293	0,093	0,2	-0,035	0,035	0,25
	M14	6	6,080	0,080	6,087	0,087	6,084	0,083	0,2	-0,007	0,007	0,05
	M15	19	19,059	0,059	19,051	0,051	19,055	0,055	0,25	0,008	0,008	0,06
4.07	M1	100	99,724	0,276	99,629	0,371	99,677	0,323	0,25	0,095	0,095	0,68
	M2	80	79,654	0,346	79,532	0,468	79,593	0,407	0,25	0,122	0,122	0,87
	M3	59	58,652	0,348	58,367	0,633	58,510	0,490	0,25	0,285	0,285	2,04
	M4	25,8	25,526	0,274	25,419	0,381	25,473	0,328	0,25	0,107	0,107	0,77
	M5	70	70,307	0,307	70,202	0,202	70,255	0,255	0,25	0,105	0,105	0,75
	M6	22	22,315	0,315	22,461	0,461	22,388	0,388	0,25	-0,146	0,146	1,05
	M7	15	14,557	0,443	14,688	0,312	14,623	0,378	0,25	-0,131	0,131	0,94
	M8	5,5	5,830	0,330	5,724	0,224	5,777	0,277	0,2	0,106	0,106	0,76
	M9	4,6	4,348	0,252	4,427	0,173	4,388	0,213	0,2	-0,079	0,079	0,57

	M10	28,3	28,532	0,232	28,556	0,256	28,544	0,244	0,25	-0,024	0,024	0,17
	M11	4,3	4,571	0,271	4,498	0,198	4,535	0,235	0,2	0,073	0,073	0,52
	M12	6,2	6,318	0,118	6,274	0,074	6,296	0,096	0,2	0,044	0,044	0,32
	M13	8,2	8,255	0,055	8,346	0,146	8,301	0,101	0,2	-0,091	0,091	0,65
	M14	6	6,168	0,168	6,203	0,203	6,186	0,186	0,2	-0,035	0,035	0,25
	M15	19	19,047	0,047	19,168	0,168	19,108	0,108	0,25	-0,121	0,121	0,87
4.08	M1	100	99,766	0,234	99,743	0,257	99,755	0,245	0,25	0,023	0,023	0,16
	M2	80	79,412	0,588	79,380	0,620	79,396	0,604	0,25	0,032	0,032	0,23
	M3	59	58,648	0,352	58,590	0,410	58,619	0,381	0,25	0,058	0,058	0,42
	M4	25,8	25,380	0,420	25,327	0,473	25,354	0,447	0,25	0,053	0,053	0,38
	M5	70	70,314	0,314	70,349	0,349	70,332	0,332	0,25	-0,035	0,035	0,25
	M6	22	22,378	0,378	22,424	0,424	22,401	0,401	0,25	-0,046	0,046	0,33
	M7	15	14,723	0,277	14,693	0,307	14,708	0,292	0,25	0,030	0,030	0,21
	M8	5,5	5,895	0,395	5,917	0,417	5,906	0,406	0,2	-0,022	0,022	0,16
	M9	4,6	4,380	0,220	4,349	0,251	4,365	0,236	0,2	0,031	0,031	0,22
	M10	28,3	28,491	0,191	28,506	0,206	28,499	0,198	0,25	-0,015	0,015	0,11
	M11	4,3	4,565	0,265	4,596	0,296	4,581	0,281	0,2	-0,031	0,031	0,22
	M12	6,2	6,295	0,095	6,290	0,090	6,293	0,093	0,2	0,005	0,005	0,04
	M13	8,2	8,271	0,071	8,268	0,068	8,270	0,070	0,2	0,003	0,003	0,02
	M14	6	6,098	0,098	6,110	0,110	6,104	0,104	0,2	-0,012	0,012	0,09
	M15	19	19,045	0,045	19,039	0,039	19,042	0,042	0,25	0,006	0,006	0,04
4.09	M1	100	99,657	0,343	99,638	0,362	99,648	0,352	0,25	0,019	0,019	0,14
	M2	80	79,612	0,388	79,538	0,462	79,575	0,425	0,25	0,074	0,074	0,53
	M3	59	58,613	0,387	58,534	0,466	58,574	0,427	0,25	0,079	0,079	0,57
	M4	25,8	25,340	0,460	25,278	0,522	25,309	0,491	0,25	0,062	0,062	0,44
	M5	70	70,315	0,315	70,406	0,406	70,361	0,361	0,25	-0,091	0,091	0,65

	M6	22	22,362	0,362	22,454	0,454	22,408	0,408	0,25	-0,092	0,092	0,66
	M7	15	14,739	0,261	14,641	0,359	14,690	0,310	0,25	0,098	0,098	0,70
	M8	5,5	5,886	0,386	5,841	0,341	5,864	0,364	0,2	0,045	0,045	0,32
	M9	4,6	4,334	0,266	4,275	0,325	4,305	0,296	0,2	0,059	0,059	0,42
	M10	28,3	28,533	0,233	28,577	0,277	28,555	0,255	0,25	-0,044	0,044	0,32
	M11	4,3	4,628	0,328	4,670	0,370	4,649	0,349	0,2	-0,042	0,042	0,30
	M12	6,2	6,197	0,003	6,284	0,084	6,241	0,040	0,2	-0,087	0,087	0,62
	M13	8,2	8,276	0,076	8,316	0,116	8,296	0,096	0,2	-0,040	0,040	0,29
	M14	6	6,100	0,100	6,201	0,201	6,151	0,150	0,2	-0,101	0,101	0,72
	M15	19	19,130	0,130	19,208	0,208	19,169	0,169	0,25	-0,078	0,078	0,56
4.11	M1	100	99,641	0,359	99,567	0,433	99,604	0,396	0,25	0,074	0,074	0,53
	M2	80	79,678	0,322	79,576	0,424	79,627	0,373	0,25	0,102	0,102	0,73
	M3	59	58,636	0,364	58,544	0,456	58,590	0,410	0,25	0,092	0,092	0,66
	M4	25,8	25,349	0,451	25,242	0,558	25,296	0,505	0,25	0,107	0,107	0,77
	M5	70	70,275	0,275	70,384	0,384	70,330	0,329	0,25	-0,109	0,109	0,78
	M6	22	22,342	0,342	22,447	0,447	22,395	0,395	0,25	-0,105	0,105	0,75
	M7	15	14,683	0,317	14,587	0,413	14,635	0,365	0,25	0,096	0,096	0,69
	M8	5,5	5,843	0,343	5,946	0,446	5,895	0,395	0,2	-0,103	0,103	0,74
	M9	4,6	4,390	0,210	4,324	0,276	4,357	0,243	0,2	0,066	0,066	0,47
	M10	28,3	28,432	0,132	28,458	0,158	28,445	0,145	0,25	-0,026	0,026	0,19
	M11	4,3	4,523	0,223	4,559	0,259	4,541	0,241	0,2	-0,036	0,036	0,26
	M12	6,2	6,352	0,152	6,374	0,174	6,363	0,163	0,2	-0,022	0,022	0,16
	M13	8,2	8,312	0,112	8,314	0,114	8,313	0,113	0,2	-0,002	0,002	0,01
	M14	6	6,095	0,095	6,114	0,114	6,105	0,105	0,2	-0,019	0,019	0,14
	M15	19	19,063	0,063	19,080	0,080	19,072	0,072	0,25	-0,017	0,017	0,12
4.12	M1	100	99,617	0,383	99,556	0,444	99,587	0,413	0,25	0,061	0,061	0,44

	M2	80	79,659	0,341	79,590	0,410	79,625	0,375	0,25	0,069	0,069	0,49
	M3	59	58,672	0,328	58,617	0,383	58,645	0,356	0,25	0,055	0,055	0,39
	M4	25,8	25,449	0,351	25,388	0,412	25,419	0,381	0,25	0,061	0,061	0,44
	M5	70	70,229	0,229	70,300	0,300	70,265	0,264	0,25	-0,071	0,071	0,51
	M6	22	22,312	0,312	22,403	0,403	22,358	0,358	0,25	-0,091	0,091	0,65
	M7	15	14,640	0,360	14,610	0,390	14,625	0,375	0,25	0,030	0,030	0,21
	M8	5,5	5,849	0,349	5,910	0,410	5,879	0,379	0,2	-0,062	0,062	0,44
	M9	4,6	4,358	0,242	4,329	0,271	4,344	0,257	0,2	0,029	0,029	0,21
	M10	28,3	28,411	0,111	28,446	0,146	28,429	0,128	0,25	-0,035	0,035	0,25
	M11	4,3	4,495	0,195	4,537	0,237	4,516	0,216	0,2	-0,042	0,042	0,30
	M12	6,2	6,339	0,139	6,387	0,187	6,363	0,163	0,2	-0,048	0,048	0,34
	M13	8,2	8,263	0,063	8,286	0,086	8,275	0,075	0,2	-0,023	0,023	0,16
	M14	6	6,089	0,089	6,112	0,112	6,101	0,101	0,2	-0,023	0,023	0,16
	M15	19	19,071	0,071	19,093	0,093	19,082	0,082	0,25	-0,022	0,022	0,16
	4.13	M1	100	99,748	0,252	99,717	0,283	99,733	0,267	0,25	0,031	0,031
M2		80	79,803	0,197	79,745	0,255	79,774	0,226	0,25	0,058	0,058	0,42
M3		59	58,684	0,316	58,663	0,337	58,674	0,327	0,25	0,021	0,021	0,15
M4		25,8	25,558	0,242	25,427	0,373	25,493	0,308	0,25	0,131	0,131	0,94
M5		70	70,241	0,241	70,269	0,269	70,255	0,255	0,25	-0,028	0,028	0,20
M6		22	22,255	0,255	22,301	0,301	22,278	0,278	0,25	-0,046	0,046	0,33
M7		15	14,769	0,231	14,680	0,320	14,725	0,276	0,25	0,089	0,089	0,64
M8		5,5	5,742	0,242	5,855	0,355	5,799	0,299	0,2	-0,113	0,113	0,81
M9		4,6	4,447	0,153	4,310	0,290	4,379	0,222	0,2	0,137	0,137	0,98
M10		28,3	28,322	0,022	28,415	0,115	28,369	0,068	0,25	-0,093	0,093	0,67
M11		4,3	4,332	0,032	4,347	0,047	4,340	0,040	0,2	-0,015	0,015	0,11
M12		6,2	6,284	0,084	6,309	0,109	6,297	0,096	0,2	-0,025	0,025	0,18

	M13	8,2	8,204	0,004	8,252	0,052	8,228	0,028	0,2	-0,048	0,048	0,34
	M14	6	6,137	0,137	6,160	0,160	6,149	0,149	0,2	-0,023	0,023	0,16
	M15	19	19,052	0,052	19,111	0,111	19,082	0,081	0,25	-0,059	0,059	0,42

4 priedas. 6 mm storio bandinių matmenų matavimo rezultatai

Bandinio numeris	Matmens numeris	Nominalus matmuo, mm	Išmatuotas matmuo (viršus), mm	Skirtumas (viršus), mm	Išmatuotas matmuo (apačia), mm	Skirtumas (apačia), mm	Matavimo vidurkis, mm	Skirtumo modulis, mm	Tolerancija, mm (pagal ISO 9013:2017)	VP-AP, mm	VP-AP , mm	Pjūvio plėtėjimo kampas, °
6.01	M1	100	99,891	0,109	99,725	0,275	99,808	0,192	0,25	0,166	0,166	0,79
	M2	80	79,910	0,090	79,790	0,210	79,850	0,150	0,25	0,120	0,120	0,57
	M3	59	58,920	0,080	58,746	0,254	58,833	0,167	0,25	0,174	0,174	0,83
	M4	25,8	25,700	0,100	25,571	0,229	25,636	0,165	0,25	0,129	0,129	0,62
	M5	70	70,050	0,050	70,185	0,185	70,118	0,118	0,25	-0,135	0,135	0,64
	M6	22	22,060	0,060	22,188	0,188	22,124	0,124	0,25	-0,128	0,128	0,61
	M7	15	14,912	0,088	14,768	0,232	14,840	0,160	0,25	0,144	0,144	0,69
	M8	5,5	5,621	0,121	5,735	0,235	5,678	0,178	0,2	-0,114	0,114	0,54
	M9	4,6	4,566	0,034	4,398	0,202	4,482	0,118	0,2	0,168	0,168	0,80
	M10	28,3	28,383	0,083	28,570	0,270	28,477	0,177	0,25	-0,187	0,187	0,89
	M11	4,3	4,447	0,147	4,551	0,251	4,499	0,199	0,2	-0,104	0,104	0,50
	M12	6,2	6,130	0,070	6,319	0,119	6,225	0,024	0,2	-0,189	0,189	0,90
	M13	8,2	8,137	0,063	8,319	0,119	8,228	0,028	0,2	-0,182	0,182	0,87
	M14	6	5,983	0,018	6,180	0,180	6,081	0,081	0,2	-0,198	0,198	0,94
	M15	19	18,961	0,039	19,106	0,106	19,034	0,034	0,25	-0,145	0,145	0,69
6.02	M1	100	99,933	0,067	99,779	0,221	99,856	0,144	0,25	0,154	0,154	0,74
	M2	80	79,971	0,029	79,830	0,170	79,901	0,100	0,25	0,141	0,141	0,67
	M3	59	58,940	0,060	58,783	0,217	58,862	0,139	0,25	0,157	0,157	0,75

	M4	25,8	25,735	0,065	25,606	0,194	25,671	0,130	0,25	0,129	0,129	0,62
	M5	70	69,998	0,002	70,122	0,122	70,060	0,060	0,25	-0,124	0,124	0,59
	M6	22	22,028	0,028	22,139	0,139	22,084	0,084	0,25	-0,111	0,111	0,53
	M7	15	14,963	0,037	14,828	0,172	14,896	0,105	0,25	0,135	0,135	0,64
	M8	5,5	5,591	0,091	5,685	0,185	5,638	0,138	0,2	-0,094	0,094	0,45
	M9	4,6	4,592	0,008	4,430	0,170	4,511	0,089	0,2	0,162	0,162	0,77
	M10	28,3	28,366	0,066	28,553	0,253	28,460	0,159	0,25	-0,187	0,187	0,89
	M11	4,3	4,427	0,127	4,563	0,263	4,495	0,195	0,2	-0,136	0,136	0,65
	M12	6,2	6,122	0,078	6,309	0,109	6,216	0,016	0,2	-0,187	0,187	0,89
	M13	8,2	8,151	0,050	8,352	0,152	8,251	0,051	0,2	-0,202	0,202	0,96
	M14	6	5,979	0,021	6,178	0,178	6,079	0,079	0,2	-0,199	0,199	0,95
	M15	19	18,953	0,047	19,132	0,132	19,043	0,043	0,25	-0,179	0,179	0,86
6.03	M1	100	99,948	0,052	99,782	0,218	99,865	0,135	0,25	0,166	0,166	0,79
	M2	80	80,032	0,032	79,903	0,097	79,968	0,032	0,25	0,129	0,129	0,62
	M3	59	58,975	0,025	58,815	0,185	58,895	0,105	0,25	0,160	0,160	0,76
	M4	25,8	25,950	0,150	25,829	0,029	25,890	0,089	0,25	0,121	0,121	0,58
	M5	70	69,956	0,044	70,083	0,083	70,020	0,019	0,25	-0,127	0,127	0,61
	M6	22	21,940	0,060	22,044	0,044	21,992	0,008	0,25	-0,104	0,104	0,50
	M7	15	14,993	0,007	14,846	0,154	14,920	0,081	0,25	0,147	0,147	0,70
	M8	5,5	5,527	0,027	5,658	0,158	5,593	0,093	0,2	-0,131	0,131	0,63
	M9	4,6	4,597	0,003	4,431	0,169	4,514	0,086	0,2	0,166	0,166	0,79
	M10	28,3	28,335	0,035	28,541	0,241	28,438	0,138	0,25	-0,206	0,206	0,98
	M11	4,3	4,401	0,101	4,546	0,246	4,474	0,174	0,2	-0,145	0,145	0,69
	M12	6,2	6,117	0,083	6,312	0,112	6,215	0,015	0,2	-0,195	0,195	0,93
	M13	8,2	8,143	0,057	8,335	0,135	8,239	0,039	0,2	-0,192	0,192	0,92
	M14	6	5,988	0,012	6,193	0,193	6,091	0,091	0,2	-0,205	0,205	0,98

	M15	19	18,973	0,027	19,112	0,112	19,043	0,042	0,25	-0,139	0,139	0,66
6.05	M1	100	99,899	0,101	99,741	0,259	99,820	0,180	0,25	0,158	0,158	0,75
	M2	80	79,973	0,027	79,832	0,168	79,903	0,097	0,25	0,141	0,141	0,67
	M3	59	58,874	0,126	58,727	0,273	58,801	0,200	0,25	0,147	0,147	0,70
	M4	25,8	25,672	0,128	25,524	0,276	25,598	0,202	0,25	0,148	0,148	0,71
	M5	70	70,031	0,031	70,144	0,144	70,088	0,088	0,25	-0,113	0,113	0,54
	M6	22	22,036	0,036	22,186	0,186	22,111	0,111	0,25	-0,150	0,150	0,72
	M7	15	14,927	0,073	14,780	0,220	14,854	0,147	0,25	0,147	0,147	0,70
	M8	5,5	5,642	0,142	5,733	0,233	5,688	0,188	0,2	-0,091	0,091	0,43
	M9	4,6	4,549	0,051	4,383	0,217	4,466	0,134	0,2	0,166	0,166	0,79
	M10	28,3	28,380	0,080	28,633	0,333	28,507	0,206	0,25	-0,253	0,253	1,21
	M11	4,3	4,470	0,170	4,580	0,280	4,525	0,225	0,2	-0,110	0,110	0,53
	M12	6,2	6,114	0,086	6,333	0,132	6,223	0,023	0,2	-0,219	0,219	1,04
	M13	8,2	8,149	0,051	8,343	0,143	8,246	0,046	0,2	-0,194	0,194	0,93
	M14	6	5,995	0,005	6,212	0,212	6,104	0,104	0,2	-0,217	0,217	1,04
	M15	19	18,960	0,040	19,134	0,134	19,047	0,047	0,25	-0,174	0,174	0,83
6.07	M1	100	99,811	0,189	99,681	0,319	99,746	0,254	0,25	0,130	0,130	0,62
	M2	80	79,987	0,013	79,754	0,246	79,871	0,130	0,25	0,233	0,233	1,11
	M3	59	58,864	0,136	58,812	0,188	58,838	0,162	0,25	0,052	0,052	0,25
	M4	25,8	25,950	0,150	25,668	0,132	25,809	0,009	0,25	0,282	0,282	1,35
	M5	70	69,841	0,159	70,113	0,113	69,977	0,023	0,25	-0,272	0,272	1,30
	M6	22	21,752	0,248	21,952	0,048	21,852	0,148	0,25	-0,200	0,200	0,96
	M7	15	14,970	0,030	14,807	0,193	14,889	0,111	0,25	0,163	0,163	0,78
	M8	5,5	5,637	0,137	5,768	0,268	5,703	0,203	0,2	-0,131	0,131	0,63
	M9	4,6	4,839	0,239	4,743	0,143	4,791	0,191	0,2	0,096	0,096	0,46
	M10	28,3	28,444	0,144	28,601	0,301	28,523	0,223	0,25	-0,157	0,157	0,75

	M11	4,3	4,438	0,138	4,487	0,187	4,463	0,163	0,2	-0,049	0,049	0,23
	M12	6,2	6,070	0,130	6,144	0,056	6,107	0,093	0,2	-0,074	0,074	0,35
	M13	8,2	8,097	0,103	8,277	0,077	8,187	0,013	0,2	-0,180	0,180	0,86
	M14	6	6,015	0,015	6,266	0,266	6,141	0,140	0,2	-0,251	0,251	1,20
	M15	19	18,984	0,016	19,147	0,147	19,066	0,066	0,25	-0,163	0,163	0,78
6.08	M1	100	99,841	0,159	99,687	0,313	99,764	0,236	0,25	0,154	0,154	0,74
	M2	80	79,829	0,171	79,720	0,280	79,775	0,226	0,25	0,109	0,109	0,52
	M3	59	58,857	0,143	58,681	0,319	58,769	0,231	0,25	0,176	0,176	0,84
	M4	25,8	25,730	0,070	25,607	0,193	25,669	0,131	0,25	0,123	0,123	0,59
	M5	70	70,068	0,068	70,218	0,218	70,143	0,143	0,25	-0,150	0,150	0,72
	M6	22	22,071	0,071	22,201	0,201	22,136	0,136	0,25	-0,130	0,130	0,62
	M7	15	14,884	0,116	14,718	0,282	14,801	0,199	0,25	0,166	0,166	0,79
	M8	5,5	5,672	0,172	5,791	0,291	5,732	0,232	0,2	-0,119	0,119	0,57
	M9	4,6	4,533	0,067	4,347	0,253	4,440	0,160	0,2	0,186	0,186	0,89
	M10	28,3	28,413	0,113	28,601	0,301	28,507	0,207	0,25	-0,188	0,188	0,90
	M11	4,3	4,490	0,190	4,596	0,296	4,543	0,243	0,2	-0,106	0,106	0,51
	M12	6,2	6,115	0,085	6,228	0,028	6,172	0,029	0,2	-0,113	0,113	0,54
	M13	8,2	8,152	0,048	8,345	0,145	8,249	0,049	0,2	-0,193	0,193	0,92
	M14	6	5,990	0,010	6,147	0,147	6,069	0,069	0,2	-0,157	0,157	0,75
	M15	19	18,964	0,036	19,142	0,142	19,053	0,053	0,25	-0,178	0,178	0,85
6.09	M1	100	99,898	0,102	99,575	0,425	99,737	0,263	0,25	0,323	0,323	1,54
	M2	80	79,960	0,040	79,632	0,368	79,796	0,204	0,25	0,328	0,328	1,57
	M3	59	58,922	0,078	58,612	0,388	58,767	0,233	0,25	0,310	0,310	1,48
	M4	25,8	25,642	0,158	25,280	0,520	25,461	0,339	0,25	0,362	0,362	1,73
	M5	70	70,025	0,025	70,342	0,342	70,184	0,184	0,25	-0,317	0,317	1,51
	M6	22	22,100	0,100	22,372	0,372	22,236	0,236	0,25	-0,272	0,272	1,30

	M7	15	14,933	0,067	14,615	0,385	14,774	0,226	0,25	0,318	0,318	1,52
	M8	5,5	5,623	0,123	5,875	0,375	5,749	0,249	0,2	-0,252	0,252	1,20
	M9	4,6	4,572	0,028	4,336	0,264	4,454	0,146	0,2	0,236	0,236	1,13
	M10	28,3	28,400	0,100	28,576	0,276	28,488	0,188	0,25	-0,176	0,176	0,84
	M11	4,3	4,457	0,157	4,573	0,273	4,515	0,215	0,2	-0,116	0,116	0,55
	M12	6,2	6,115	0,085	6,332	0,132	6,224	0,023	0,2	-0,217	0,217	1,04
	M13	8,2	8,145	0,055	8,345	0,145	8,245	0,045	0,2	-0,200	0,200	0,96
	M14	6	5,993	0,007	6,195	0,195	6,094	0,094	0,2	-0,202	0,202	0,96
	M15	19	18,971	0,029	19,134	0,134	19,053	0,053	0,25	-0,163	0,163	0,78
6.10	M1	100	99,913	0,087	99,661	0,339	99,787	0,213	0,25	0,252	0,252	1,20
	M2	80	79,878	0,122	79,570	0,430	79,724	0,276	0,25	0,308	0,308	1,47
	M3	59	58,907	0,093	58,678	0,322	58,793	0,208	0,25	0,229	0,229	1,09
	M4	25,8	25,805	0,005	25,550	0,250	25,678	0,122	0,25	0,255	0,255	1,22
	M5	70	69,991	0,009	70,193	0,193	70,092	0,092	0,25	-0,202	0,202	0,96
	M6	22	22,034	0,034	22,361	0,361	22,198	0,197	0,25	-0,327	0,327	1,56
	M7	15	14,955	0,045	14,713	0,287	14,834	0,166	0,25	0,242	0,242	1,16
	M8	5,5	5,584	0,084	5,863	0,363	5,724	0,224	0,2	-0,279	0,279	1,33
	M9	4,6	4,561	0,039	4,312	0,288	4,437	0,163	0,2	0,249	0,249	1,19
	M10	28,3	28,213	0,087	28,448	0,148	28,331	0,031	0,25	-0,235	0,235	1,12
	M11	4,3	4,266	0,034	4,485	0,185	4,376	0,076	0,2	-0,219	0,219	1,05
	M12	6,2	6,187	0,013	6,385	0,185	6,286	0,086	0,2	-0,198	0,198	0,95
	M13	8,2	8,143	0,057	8,364	0,164	8,254	0,054	0,2	-0,221	0,221	1,06
	M14	6	5,997	0,003	6,223	0,223	6,110	0,110	0,2	-0,226	0,226	1,08
	M15	19	18,989	0,011	19,219	0,219	19,104	0,104	0,25	-0,230	0,230	1,10
6.11	M1	100	99,832	0,168	99,562	0,438	99,697	0,303	0,25	0,270	0,270	1,29
	M2	80	80,014	0,014	79,487	0,513	79,751	0,250	0,25	0,527	0,527	2,52

	M3	59	58,869	0,131	58,703	0,297	58,786	0,214	0,25	0,166	0,166	0,79	
	M4	25,8	25,606	0,194	24,687	1,113	25,147	0,653	0,25	0,919	0,919	4,39	
	M5	70	70,077	0,077	70,434	0,434	70,256	0,255	0,25	-0,357	0,357	1,71	
	M6	22	21,985	0,015	22,836	0,836	22,411	0,410	0,25	-0,851	0,851	4,07	
	M7	15	15,030	0,030	14,608	0,392	14,819	0,181	0,25	0,422	0,422	2,02	
	M8	5,5	5,596	0,096	6,137	0,637	5,867	0,367	0,2	-0,541	0,541	2,58	
	M9	4,6	4,551	0,049	4,472	0,128	4,512	0,088	0,2	0,079	0,079	0,38	
	M10	28,3	28,273	0,027	28,439	0,139	28,356	0,056	0,25	-0,166	0,166	0,79	
	M11	4,3	4,282	0,018	4,557	0,257	4,420	0,120	0,2	-0,275	0,275	1,31	
	M12	6,2	6,185	0,015	6,341	0,141	6,263	0,063	0,2	-0,156	0,156	0,75	
	M13	8,2	8,155	0,045	8,231	0,031	8,193	0,007	0,2	-0,076	0,076	0,36	
	M14	6	6,067	0,067	6,210	0,210	6,139	0,139	0,2	-0,143	0,143	0,68	
	M15	19	18,981	0,019	19,087	0,087	19,034	0,034	0,25	-0,106	0,106	0,51	
	6.12	M1	100	99,985	0,015	99,721	0,279	99,853	0,147	0,25	0,264	0,264	1,26
		M2	80	79,824	0,176	79,628	0,372	79,726	0,274	0,25	0,196	0,196	0,94
M3		59	58,917	0,083	58,613	0,387	58,765	0,235	0,25	0,304	0,304	1,45	
M4		25,8	25,868	0,068	25,525	0,275	25,697	0,104	0,25	0,343	0,343	1,64	
M5		70	70,138	0,138	70,271	0,271	70,205	0,204	0,25	-0,133	0,133	0,64	
M6		22	22,039	0,039	22,364	0,364	22,202	0,202	0,25	-0,325	0,325	1,55	
M7		15	15,007	0,007	14,657	0,343	14,832	0,168	0,25	0,350	0,350	1,67	
M8		5,5	5,668	0,168	5,868	0,368	5,768	0,268	0,2	-0,200	0,200	0,96	
M9		4,6	4,514	0,086	4,232	0,368	4,373	0,227	0,2	0,282	0,282	1,35	
M10		28,3	28,229	0,071	28,496	0,196	28,363	0,062	0,25	-0,267	0,267	1,28	
M11		4,3	4,281	0,019	4,534	0,234	4,408	0,108	0,2	-0,253	0,253	1,21	
M12		6,2	6,069	0,131	6,275	0,075	6,172	0,028	0,2	-0,206	0,206	0,98	
M13		8,2	8,082	0,118	8,161	0,039	8,122	0,078	0,2	-0,079	0,079	0,38	

	M14	6	6,044	0,044	6,100	0,100	6,072	0,072	0,2	-0,056	0,056	0,27
	M15	19	19,048	0,048	19,134	0,134	19,091	0,091	0,25	-0,086	0,086	0,41
6.13	M1	100	99,938	0,062	99,841	0,159	99,890	0,111	0,25	0,097	0,097	0,46
	M2	80	79,930	0,070	79,869	0,131	79,900	0,100	0,25	0,061	0,061	0,29
	M3	59	58,974	0,026	58,891	0,109	58,933	0,068	0,25	0,083	0,083	0,40
	M4	25,8	25,654	0,146	25,653	0,147	25,654	0,147	0,25	0,001	0,001	0,00
	M5	70	69,907	0,093	69,996	0,004	69,952	0,049	0,25	-0,089	0,089	0,43
	M6	22	22,052	0,052	22,121	0,121	22,087	0,087	0,25	-0,069	0,069	0,33
	M7	15	14,954	0,046	14,942	0,058	14,948	0,052	0,25	0,012	0,012	0,06
	M8	5,5	5,484	0,016	5,557	0,057	5,521	0,021	0,2	-0,073	0,073	0,35
	M9	4,6	4,471	0,129	4,406	0,194	4,439	0,162	0,2	0,065	0,065	0,31
	M10	28,3	28,263	0,037	28,470	0,170	28,367	0,067	0,25	-0,207	0,207	0,99
	M11	4,3	4,260	0,040	4,357	0,057	4,309	0,009	0,2	-0,097	0,097	0,46
	M12	6,2	6,122	0,078	6,168	0,032	6,145	0,055	0,2	-0,046	0,046	0,22
	M13	8,2	8,167	0,033	8,396	0,196	8,282	0,082	0,2	-0,229	0,229	1,09
	M14	6	6,025	0,025	6,241	0,241	6,133	0,133	0,2	-0,216	0,216	1,03
	M15	19	18,967	0,033	19,168	0,168	19,068	0,067	0,25	-0,201	0,201	0,96

**5 priedas. Dalyvavimo jaunujų mokslininkų konferencijoje „Industrial Engineering 2023
Circular Economy: Production and Consumption“ sertifikatas**



The 10th International Young Researchers Conference

May 10, 2023

**Industrial Engineering 2023
CIRCULAR ECONOMY:
PRODUCTION AND
CONSUMPTION**

V24-11-30

Certificate

This certificate confirms that

Laura Čepauskaitė

attended in 10th International Young Researchers Conference
“Industrial Engineering 2023 – Circular Economy: Production and Consumption”
and published the article

**“Papermate” – a Smart, Easy-to-Transport Container for
Paper Collection, Sorting, Pressing and Temporary Storage**

in the conference proceedings

dr. Andrius Vilkauskas

Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Design

