



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tomas Šukys**

**ĮVAIRIŲ VEIKSNIŲ ĮTAKA PRECIZINIŲ DETALIŲ KOKYBEI**  
**MECHANINIO APDIRBIMO METU**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Saulius Baskutis

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**ĮVAIRIŲ VEIKSNIŲ ĮTAKA PRECIZINIŲ DETALIŲ KOKYBEI**  
**MECHANINIO APDIRBIMO METU**

Baigiamasis magistro projektas  
Gamybos inžinerija (621H70004)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Saulius Baskutis

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Rolandas Bartkus

(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Tomas Šukys

(data)

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Gamybos inžinerijos  
katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

**Kazimieras Juzėnas**  
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS  
Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis projektas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas, kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju projektu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Projekto tema \_\_\_\_\_ Įvairių veiksnių įtaka precizinių detalių kokybei mechaninio apdirbimo metu

Patvirtinta 2017 m. gruodžio 11 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-12

2. Projekto tikslas \_\_\_\_\_ Šio darbo tikslas yra ištirti įvairių veiksnių, tokių kaip apdirbimo režimai, aušinimo skysčio temperatūra, peilio nudilimo įtaka precizinių detalių kokybės parametrams vykdant automatinį gamybos procesą.

3. Projekto struktūra \_\_\_\_\_  
Įvadas;  
Literatūros apžvalga;  
Bandymuose naudojama įranga ir metodika  
Apdirbimo režimų įtakos matmens tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui tyrimas;  
Matmens vertės priklausomybės nuo aušinimo skysčio temperatūros tyrimas;  
Tekinimo įrankių vibracijų priklausomybės nuo įrankio nudilimo tipo ir dydžio tyrimas;  
Išvados;  
Literatūra;  
Priedai

4. Reikalavimai ir sąlygos \_\_\_\_\_ Paruošti projektą pagal Kauno Technologijos Universiteto reikalavimus.

5. Projekto pateikimo terminas 2017 m. gruodžio \_\_\_\_\_ mėn. 21 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Studentas \_\_\_\_\_ **Tomas Šukys**  
(studento vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

Vadovas \_\_\_\_\_ **Doc. dr. Saulius Baskutis**  
(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Tomas Šukys

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

### AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Tomo Šukio**, baigiamasis projektas tema „Įvairių veiksnių įtaka precizinių detalių kokybei mechaninio apdirbimo metu“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Tomas Šukys. Įvairių veiksnių įtaka precizinių detalių kokybei mechaninio apdirbimo metu. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Saulius Baskutis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *mechaninis apdirbimas, matmens tikslumas, šiurkštumas, vibracijos, tekinimas.*

Kaunas, 2018. 50 p.

## SANTRAUKA

Dauguma metalo apdirbimo įmonių apdirbimui naudojančių pilnai automatines apdirbimo sistemas susiduria su problemomis, kai reikia užtikrinti reikiamą detalių kokybę visos partijos gamybos metu. Todėl yra reikalinga suprasti įvairių veiksnių įtaką detalių kokybei, nes tai padėtų užtikrinti stabilų gamybos procesą ir būtų išvengta broko.

Magistrinio darbo tikslas: suprasti įvairių veiksnių įtaką precizinių detalių kokybei automatinio apdirbimo metu ir pasiūlyti būdus, kaip išvengti broko.

Darbo metu buvo ištirta apdirbimo režimų (pjovimo greitis, pastūma, pjovimo gylis, peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės) įtaka detalių matmens tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui. Bandymuose buvo naudojamas titano lydinys Ti-6AL-4V. Ištirta aušinimo skysčio temperatūros pokyčio įtaka detalių matmens vertei. Darbe taip pat buvo tirtas tekinimo plokštelių nudilimas. Naudotos plokštelės su trimis skirtingais nudilimo tipais (šoninis nudilimas, plastinė deformacija, įtrūkimas).

Buvo nustatyti apdirbimo režimai kuriems esant yra gaunamos geriausios kokybės detalės, bei kokia yra kiekvieno iš apdirbimo parametrų įtaka galutiniam rezultatui. Sukurtas detalių matmenų dydžio pokyčio, priklausomybės nuo aušinimo skysčio temperatūros modelis. Taip pat nustatyta vibracijų lygio vertė esant skirtingų nudilimo tipų įrankiams.

Tomas Šukys. *The Influence of Various Machining Factors on the Quality of Precision Parts*: Master's Final Project / supervisor assoc. prof. Saulius Baskutis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.

Key words: machining, measure accuracy, roughness, vibration, turning.

Kaunas, 2018. 50 p.

## SUMMARY

Most of metal processing companies that is using fully automatic machining systems are faced with problems when they need to ensure required quality of parts during the production of the entire batch. Therefore, it is necessary to understand the influence of numerous factors on the quality of the parts, as this would help to ensure a stable machining process and making of poor quality parts could be avoided.

The aim of the master's thesis is to understand the influence of numerous factors on the quality of precision parts during automatic machining process and to propose ways to avoid poor quality parts.

During the work, the influence of machining modes (cutting speed, feed rate, cutting depth, cutting insert tip distance from the guide bush) on the dimensional accuracy and surface roughness were investigated. The titanium alloy Ti-6AL-4V was used in the tests. The influence of the change of temperature of the cooling liquid on the value of the dimension of the details was investigated. The wear of cutting inserts was also investigated. Inserts with three different wear types (normal plank wear, plastic deformation, fracture) was used.

In this work machining modes for which the best quality parts are obtained was defined and the influence of each processing parameter on the result was found. A model of the dimensional value dependence on the temperature of cooling liquid has been developed. Also, the level of vibrations of tools with different wear types was measured.

# Turinys

TERMINŲ ŽODYNAS.....	9
ĮVADAS.....	10
DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.....	11
1 LITERATŪROS APŽVALGA.....	12
1.1 Mechaninis apdirbimas.....	12
1.1.1 Pagrindiniai tekinimo parametrai.....	12
1.2 Paviršiaus šiurkštumo apibrėžimas.....	14
1.2.1 Šiurkštumo prognozavimo modeliai.....	14
1.2.2 Pjovimo režimų įtaka paviršiaus šiurkštumui.....	16
1.3 Technologinės sistemos šiluminių deformacijų ir pjovimo zonos temperatūros įtaka...	18
1.4 Virpesiai.....	20
1.4.1 Mechaninio apdirbimo metu kylančių virpesių klasifikavimas.....	21
1.4.2 Pjovimo įrankio virpesių įtaka detalės kokybei.....	23
2 BANDYMUOSE NAUDOJAMA ĮRANGA IR METODIKA.....	24
2.1 Taguchi metodo naudojimas apdirbimo režimų optimizavimui.....	26
3 APDIRBIMO REŽIMŲ ĮTAKOS MATMENS TIKSLUMUI IR PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMUI TYRIMAS.....	28
3.1 Bandymo rezultatų aptarimas.....	33
3.1.1 Cilindriškumo paklaida.....	35
3.1.2 Paviršiaus šiurkštumas.....	36
4 MATMENS VERTĖS PRIKLAUSOMYBĖS NUO AUŠINIMO SKYSČIO TEMPERATŪTOS TYRIMAS.....	37
4.1 Bandymo eiga ir rezultatai.....	38
5 TEKINIMO ĮRANKIŲ VIBRACIJŲ PRIKLAUSOMYBĖS NUO NUDILIMO DYDŽIO IR TIPO TYRIMAS.....	41
5.1 Tekinimo plokštelių nudilimo tipai.....	41
5.2 Bandyme naudota įranga.....	43

5.3	Bandymo duomenys ir rezultatai .....	44
5.3.1	Nauja tekimo plokštelė .....	46
5.3.2	Plokštelė su šoniniu nudilimu .....	47
5.3.3	Plokštelė su plastine deformacija .....	48
5.3.4	Plokštelė su įtrūkusia pjaunančiąja briauna .....	50
	IŠVADOS .....	53
	LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	55
	PRIEDAI .....	58
1	priedas. Tornos Deco 13a techninės charakteristikos [25] .....	59
2	priedas. Programos „ViciVision“ nustatymų ir gaunamų rezultatų jos aplinkoje vaizdas .	61
3	priedas. Matavimo mašinos ViciVision MTL X5 techninė specifikacija .....	62
4	priedas. Programos „ViciVision“ pateikiamos ataskaitos pavyzdys .....	63
5	priedas. Paviršiaus šiurkštumo matavimo prietaiso INNOVATEST TR220 techninė charakteristika [26] .....	64
6	priedas. Vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos ir oscilogramos .....	65



## TERMINŲ ŽODYNAS

CNC – (angl. computer numerical control) kompiuterizuotas staklių, robotų ar kitokių prietaisų valdymas.

Bazavimas – ruošinio įtvirtinimas įtaise ir tos padėties išlaikymas gamybos metu.

CBR – (angl. Cubic Boron Nitride) kūbinis boro nitridas, įrankinė medžiaga.

MQL – (angl. Minimum Quantity Lubrication) aušinimas naudojant mažą kiekį aušinimo skysčio.

PCD – (angl. Poly Crystalline Diamond) polikristalinis deimantas, įrankinė medžiaga.

SĮID – technologinės sistemos staklės, įrankis, įtaisas, detalė trumpinys.

ANOM – (angl. analysis of means) vidurkių analizė. Statistinės analizės metodas, kuris yra skirtas rasti tam tikrus skirtumus tarp duomenų grupių

ANOVA – (angl. analysis of variances) skirtumų analizė. Metodika naudojama nustatant, ar skirtumas tarp vidurkių skirtinguose duomenų rinkiniuose yra didesnis už tai, kas gali būti priskiriama tikimybei.

SĮID – technologinės sistemos staklės-įrankis-įtaisas-detalė trumpinys.

## IVADAS

Šiuolaikinėje gamyboje pagrindinis tikslas yra greitai pagaminti kokybiškas, mažos savikainos detales. Dėl šių priežasčių yra naudojamos automatinės gamybos sistemos valdomos kompiuteriais (CNC) galinčios pagaminti labai tiksliai detales per labai mažą laiko tarpą. Deja, automatinės gamybos metu yra pakankamai sunku užtikrinti reikiamą detalių kokybę visos partijos gamybos metu, ypač kai yra gaminamos precizinės detalės, todėl automatinė gamyba vis dar reikalauja nuolatinės priežiūros. Esant tokiai gamybai yra labai svarbu parinkti tinkamus pjovimo režimus, nes nuo jų priklauso paviršiaus kokybė, matmens tikslumas, įrankio tarnavimo laikas ir apdirbimo laikas.

Gamybos metu buvo pastebėta, kad staklės kol būna neįšilusios gamina vienokių matmenų detales, o kai jos įšyla tie patys matmenys pasikeičia. Dėl šios priežasties įmonėje, su kuria buvo bendradarbiaujama atliekant šį tyrimą, šiuo metu yra praktika, kad prieš pradėdant automatinę gamybą kurį laiką yra gaminamas brokas arba matuojamos visos detalės iki kol staklės įšyla ir matmenys nusistovi. Vienas iš šio darbo tikslų, bus ištirti šią priklausomybę ir taip išvengti broko bei nereikalingo darbo automatinės gamybos pradžioje.

Kita, viena iš pagrindinių, broko priežasčių yra automatinės gamybos metu nudilę įrankiai. Kadangi automatinio gamybos proceso metu nereikia žmogaus įsikišimo, kartais užtrunka nemažai laiko kol gamybos darbuotojas pastebi nudilusį įrankį ir tenka išmesti nemažai detalių į broką. Dėl šios priežasties yra reikalingas matavimo metodas, kuris sugebėtų identifikuoti nudilusį įrankį nestabdant automatinio gamybos proceso ir taip išvengti broko gamybos.

## **DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI**

Šio darbo tikslas yra ištirti įvairių veiksnių, tokių kaip apdirbimo režimai, aušinimo skysčio temperatūra, peilio nudilimo įtaka precizinių detalių kokybės parametrams vykdant automatinį gamybos procesą. Tam, kad tai pasiektume, reikės įvykdyti šias užduotis:

1. Ištirti apdirbimo režimų įtaką matmens tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui. Rasti apdirbimo režimus, kuriems esant gaunami geriausi kokybės parametrai. Ištirti kiekvieno iš tiriamų apdirbimo režimų įtaką cilindriškumo paklaidai ir paviršiaus šiurkštumui.
2. Įvertinti, kaip keičiasi detalės matmens reikšmė kintant aušinimo skysčio temperatūrai gamybos proceso metu. Pagal gautus duomenis sudaryti matmens priklausomybės nuo aušinimo skysčio temperatūros modelį, kuris padėtų išvengti broko automatinio gamybos proceso pradžioje, kol staklių temperatūra dar nėra nusistovėjusi.
3. Išmatuoti nudilusiam pjovimo įrankyje apdirbimo metu kylančias vibracijas, sukurti metodiką, kuri sugebėtų identifikuoti nudilusį įrankį apdirbimo metu.

# 1 LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1 Mechaninis apdirbimas

Mechaninis apdirbimas yra procesas, kurio metu ruošinys yra pjaunamas iki norimos formos naudojant kontroliuojamą medžiagos pašalinimo procesą. Ši sąvoka apima tokius apdirbimo būdus kaip: frezavimas, tekinimas, gręžimas, drožimas, šlifavimas. Tai yra labiausiai pasaulyje paplitęs apdirbimo būdas, nes:

1. Pasiruošimas gamybai yra pigus ir greitas palyginus su tokiais apdirbimo būdais, kaip liejimas, štapavimas ar valcavimas.
2. Naudojant šį apdirbimo būdą galima pasiekti didelį matmens tikslumą ir mažą paviršiaus šiurkštumą.
3. Galima pagaminti beveik bet kokios formos detales.

Žinoma, kaip ir visi apdirbimo būdai šis procesas turi ir trūkumų:

1. Netinka, kai reikia pašalinti didelį medžiagos kiekį, nes labai padidėja proceso trukmė ir kaina.
2. Palyginti brangus kai gamybos apimtis didelė ir nėra keliami dideli kokybės reikalavimai.

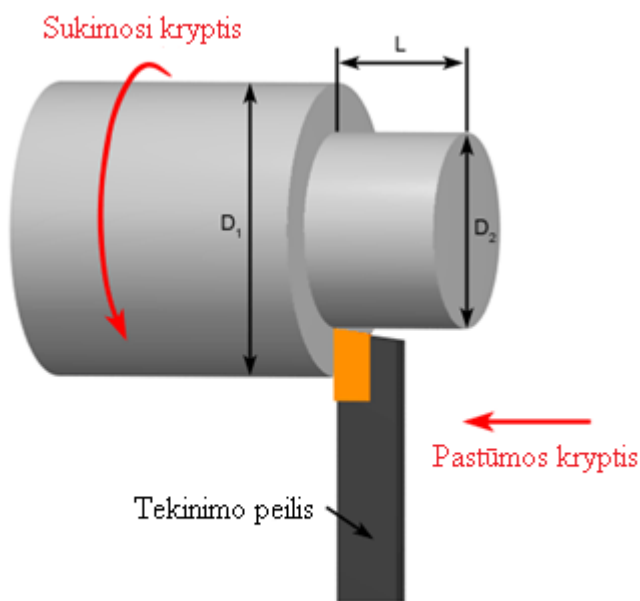
Mechaninis apdirbimas dažniausiai naudojamas kaip matmenų tikslinimo operacija, po to kai pirminis ruošinys jau buvo suformuotas kitais gamybos būdais.

### 1.1.1 Pagrindiniai tekinimo parametrai

Tekinimas yra mechaninio apdirbimo operacija, kuri yra naudojama siekiant pagaminti sukimosi formos detales nupjaunant nepageidaujamą medžiagos sluoksnį. Tekinimo procesas reikalauja tekinimo mašinos ar staklių, ruošinio, bazavimo įtaiso, ir pjovimo įrankio. Ruošinys tai iš anksto paruoštos formos medžiagos gabalas, pritvirtintas prie bazavimo įtaiso, kuris pats yra pritvirtintas prie tekinimo staklių, ir sukasi dideliu greičiu. Pjovimo peilis paprastai yra vieno taško pjovimo įrankis, kuris taip pat yra įtvirtintas staklėse, nors kai kurios operacijos naudoja kelių taškų pjovimo įrankius. Pjovimo įrankis gilindamasis į besisukantį ruošinį nupjauna medžiagos sluoksnį drožlių pavidalu, taip sukurdamas norimą formą.

Tekinimas naudojamas gaminti sukimosi, dažniausiai simetriškas ašies atžvilgiu, detales turinčias daug įvairių elementų, tokių kaip skylės, grioveliai, sriegiai, įvairių skersmens

pasikeitimų, ir net banguotų paviršių. Dalys, gaminamos vien tik tekimo staklėmis dažnai yra gaminamos nedidelėmis partijomis arba vienetinėje, prototipų gamyboje, pavyzdžiui, suprojektuoti nestandartinę veleną ar tvirtinimo detalę. Šis apdirbimo būdas taip pat dažnai naudojamas kaip antrinis procesas suteikti detalėms papildomų funkcijų ar padidinti tikslumą tų, kurios buvo pagamintos naudojant kitus gamybos procesus. Tekimo schema pateikiama 1 pav. [5].



Copyright © 2007 CustomPartNet

**1 pav.** Tekimo principinė schema [5]

Tekimo metu pjovimo parametrai yra parenkami pagal ruošinio medžiagą, įrankio medžiagą ir formą bei norimą gauti paviršiaus kokybę. Pagrindiniai parametrai yra šie:

Pjovimo greitis  $V_c$  – išorinio tekimo atveju tai kelias, kurį nueina įrankis medžiagos išoriniu paviršiumi per tam tikrą laiko tarpą, matuojamas m/min.

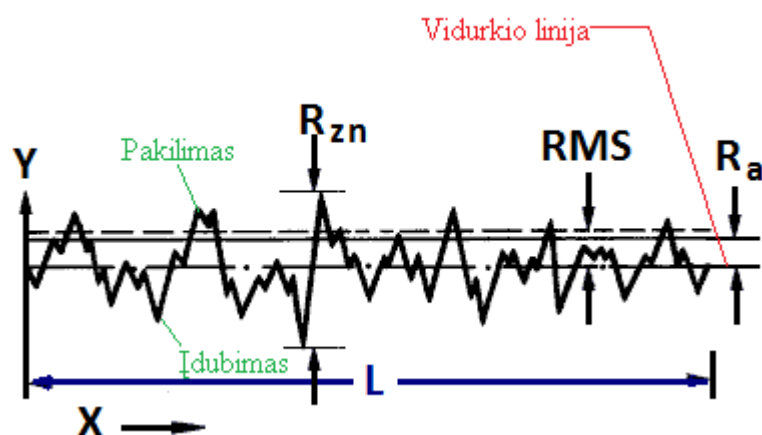
Pastūma  $s$  arba  $f$  – tai pjovimo įrankio ir ruošinio pasistūmimas išilgai vienas kito atžvilgiu, matuojamas pasislinkimu per vieną apsisukimą, mm/aps.

Pjovimo gylis  $t$  – per vieną praėjimą nupjaunamo sluoksnio storis matuojamas, mm

## 1.2 Paviršiaus šiurkštumo apibrėžimas

Detalių eksploatacines savybes lemia ne tik medžiaga, iš kurios jos buvo pagamintos, bet ir paviršiaus geometrinių matmenų tikslumas. Paviršiaus šiurkštumas yra svarbus technologinis detalių kokybės įvertinimo parametras ir taip pat rodiklis vertinant staklių našumą ir galimybę tinkamai apdirbti detales. Tinkamo paviršinio šiurkštumo gaminiai pasiekia reikiamą atsparumą nuovargiui, stiprumą, atsparumą korozijai, matmens tikslumą, ir estetiškos išvaizdos reikalavimus.

Paviršiaus šiurkštumas yra mikrogeometriniai nukrypimai, kurių žingsnio  $L$  ir aukščio  $H$  santykis  $L/H < 50$ . Jis yra vertinamas pagal profilį, kuris susidaro perkirtus tiriamą paviršių jam statmena plokštuma (žr. 2 pav.)[6].



2 pav. Šiurkštumo parametrai[6]

Praktikoje dažniausiai naudojami šiurkštumo matavimo parametrai yra šie:

$R_a$  – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, apskaičiuojamas kaip absoliučiuųjų profilio nuokrypių nuo vidurinės linijos vidurkis

$R_z$  – profilio nelygumų aukštis, išmatuotas dešimtyje taškų - penkiuose didžiausiuose ir penkiuose mažiausiuose

### 1.2.1 Šiurkštumo prognozavimo modeliai

Mechaninio apdirbimo metu, paviršiaus kokybė yra dažnai nurodoma klientų sąlygose, o paviršiaus šiurkštumas yra pagrindinis rodmuo nurodantis paviršiaus kokybę. Yra daugybė parametrų, kurie įtakoja paviršiaus šiurkštumą, todėl norint pagreitinti gamybos procesą yra reikalingas pakankamai tikslus paviršiaus šiurkštumo prognozavimo modelis.

Paprastas A.B. Abdullaho ir kt. [7] tirtas paviršiaus šiurkštumo nustatymo teorinis modelis gali būti išreikštas formule:

$$R_a = \frac{f^2}{32r}; \quad (1)$$

Čia:

$r$  – Peilio viršūnės suapvalinimo spindulys, mm;

$f$  – pastūma, mm/aps.

Pagal šią formulę, reikia mažinti tik pastūmą arba padidinti peilio viršūnės suapvalinimo spindulį, norint sumažinti paviršiaus šiurkštumą. Tačiau yra keletas problemų, susijusių su šia formule. Pirma, ji neatsižvelgia į bet kokius netobulumus pjovimo metu, pavyzdžiui, įrankių vibraciją arba auglio ant įrankio pjaunančiosios briaunos susidarymą. Antra, yra praktinių apribojimų šiam modeliui, tokių kaip tam tikri įrankiai (pavyzdžiui, CBN), kuriems reikia konkrečių geometrinių įrankio formų, siekiant pagerinti įrankio gyvavimo laiką.

Eksperimentų metu buvo nustatyta, kad esant mažoms pastūmoms, teoriškai apskaičiuotas paviršiaus šiurkštumas nesutampa su bandymų metu gautu paviršiaus šiurkštumu. Tai įvyksta nes padidėja tokių veiksnių, kaip vibracija pjovimo metu ar įrankio trintis su ruošiniu įtaka. X.D. Fangas ir kt. [8] pasiūlė teorinį šiurkštumo prognozavimo modelį, išreikštą linijine ir eksponentine funkcijomis.

$$R_a = C_0 V^{C_1} f^{C_2} t^{C_3}; \quad (2)$$

Čia:

$V$  – pjovimo greitis;

$t$  – pjovimo gylis;

$C_0, C_1, C_2, C_3$  – koeficientai nustatomi bandymų keliu.

Šis modelis gana gerai prognozuoja paviršiaus šiurkštumą kai eksperimentų metu būna nustatyti koeficientai. Deja, šiame modelyje nėra vertinama tokių veiksnių, kaip peilio viršūnės suapvalinimo spindulys, medžiagos kietumas ar pjovimo laiko įtaka, todėl šis modelis tinka tik vienos geometrijos įrankiui ir tik vienai medžiagai. Norint šį modelį pritaikyti kitai medžiagai, reiktų iš naujo nustatyti koeficientų  $C_0, C_1, C_2$  reikšmes. Dėl šios priežasties T. O zelas ir kt. [9] pasiūlė teorinį šiurkštumo prognozavimo modelį, išreikštą eksponentine funkcija, kuri įvertina daugiau veiksnių.

$$R_a = C_0 H^{C_1} C^{C_2} r^{C_3} V^{C_4} f^{C_5} L^{C_6}; \quad (3)$$

Čia:

$H$  – ruošinio kietumas, Rokfelerio skalėje;

$L$  – pjovimo ilgis ašies kryptimi.

Tyrimo metu jie sukūrė paviršiaus šiurkštumo nustatymo modelį paremtą neuroniniais tinklais, kuris sugeba tiksliai nuspėti paviršiaus šiurkštumą srityje, kuriai buvo sukurtas. Bet jie tyrė tinklą, kai buvo nenaudojamas aušinimo skystis ir dirbama vidutinėmis pastūmomis  $f=0,1$  mm/aps, todėl sukurtas tinklas gali nebetikti pasikeitus sąlygoms ar dirbant labai mažomis pastūmomis.

Nepaisant fakto, kad pakankamai tikslūs prognozavimo modeliai buvo sukurti, vis dar yra iššūkių, su kuriais reikia susidoroti. Tokie atvejai, kaip precizinių detalių gamyba, kurioje paviršiaus šiurkštumas yra labai svarbus, vis dar yra tiriami ir faktoriai, kaip įrankio dilimas ar terminės deformacijos, turėtų būti įtraukti į ateities modelius. Esantys modeliai, labiau tinka, kaip patarimojo pobūdžio informacija, kuri padėtų operatoriui apytiksliai prognozuoti būsimą paviršiaus šiurkštumą [10].

## 1.2.2 Pjovimo režimų įtaka paviršiaus šiurkštumui

Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo apdirbimo režimų yra gana plačiai nagrinėjama literatūroje [11-13]. Buvo nustatyta, kad svarbiausi parametrai, turintys įtakos paviršiaus šiurkštumui yra pjovimo greitis ir pastūma.

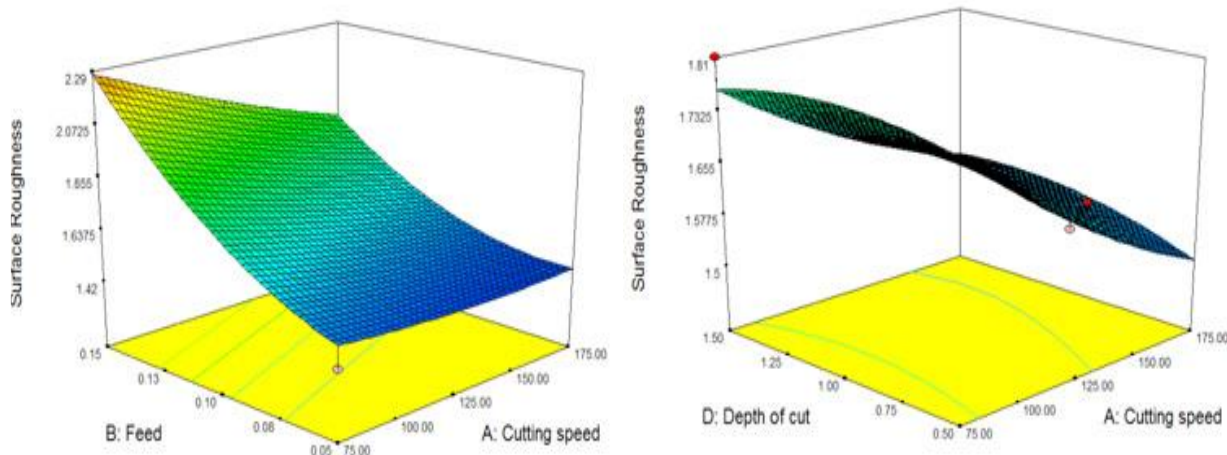
J. Nityanandamas ir kt. atliko bandymus su titano lydiniu Ti-6Al-4V [11]. Jų metu buvo keičiami tokie apdirbimo parametrai, kaip pjovimo greitis, pastūma ir pjovimo gylis. Naudotų režimų sąrašas pateikiamas 1.1 lentelėje [11].

1.1 Lentelė. Naudoti apdirbimo režimai [11]

Parametras	Matavimo vienetai	Parametų vertės		
		75	125	175
Pjovimo greitis	m/min	75	125	175
Pastūma	mm/aps	0,05	0,102	0,159
Pjovimo gylis	mm	0,5	1,0	1,5

Tyrimo metu jie nustatė, kad pjovimo gylis yra svarbiausias parametras veikiantis paviršiaus šiurkštumą, antras pagal svarbą yra pjovimo greitis, o pjovimo gylis, palyginus su kitais dviem parametrais, yra mažai svarbus. Iš jų naudotų pjovimo režimų mažiausias paviršiaus šiurkštumas apdirbant titano lydinį gali būti pasiektas esant šiems apdirbimo režimams: *Pjovimo greitis* ( $V_c$ ) = 175 m/min, *pastūma* ( $f$ ) = 0.05 mm/aps., *pjovimo gylis* ( $t$ ) = 0.5 mm. Jie taip pat pateikė 3D grafikus, kuriuose parodė paviršiaus šiurkštumo priklausomybę nuo pjovimo režimų (žr. 3 pav.) [11].





**3 pav.** Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo režimų [11]

G.D. Revankaras [12] savo darbe tyrė titano paviršiaus šiurkštumą ir kietumą, jį apdirbdamas su polikristaliniais deimantiniais įrankiais ir naudodamas įvairius aušinimo režimus. Tyrimo metu buvo tiriama šių parametru įtaka: aušinimo režimas, pjovimo greitis, pastūma, peilio viršūnės suapvalinimo spindulys, pjovimo gylis. Naudotų parametru vertės pateikiamos 1.2 lentelėje [12].

**1.2 Lentelė.** Naudoti apdirbimo režimai [12]

Parametras	Parametru vertės		
	1	2	3
Aušinimo tipas	Gausus	MQL	Sausas
Pjovimo greitis, m/min	50	100	150
Pastūma, mm/aps	0,15	0,25	0,35
Suapvalinimo spindulys, mm	0,2	0,4	0,6
Pjovimo gylis, mm	0,25	0,5	0,75

Jie nustatė, kad parametrai turintys didžiausią įtaką paviršiaus šiurkštumui yra pjovimo greitis (17,49 %) ir pastūma (72,32%). Naudojant didesnę pjovimo greitį šiurkštumas mažėja, nes dėl aukštesnės temperatūros pjovimo zonoje medžiaga suminkštėja ir sumažėjus pjovimo jėgoms gaunamas mažesnis paviršiaus šiurkštumas. Jie taip pat nustatė, kad mažiausias paviršiaus šiurkštumas gaunamas naudojant MQL aušinimo tipą, nes jis leidžia palaikyti pakankamai didelę pjovimo temperatūrą, tuo sumažindamas pjovimo jėgas ir kartu neleisdamas per daug įkaisti pjovimo zonai. Šis būdas taip pat sumažina trintį tarp peilio ir ruošinio. Didinant peilio suapvalinimo spindulį, šiurkštumas mažėja dėl ilgesnio kontakto tarp peilio ir ruošinio, bet tyrimo

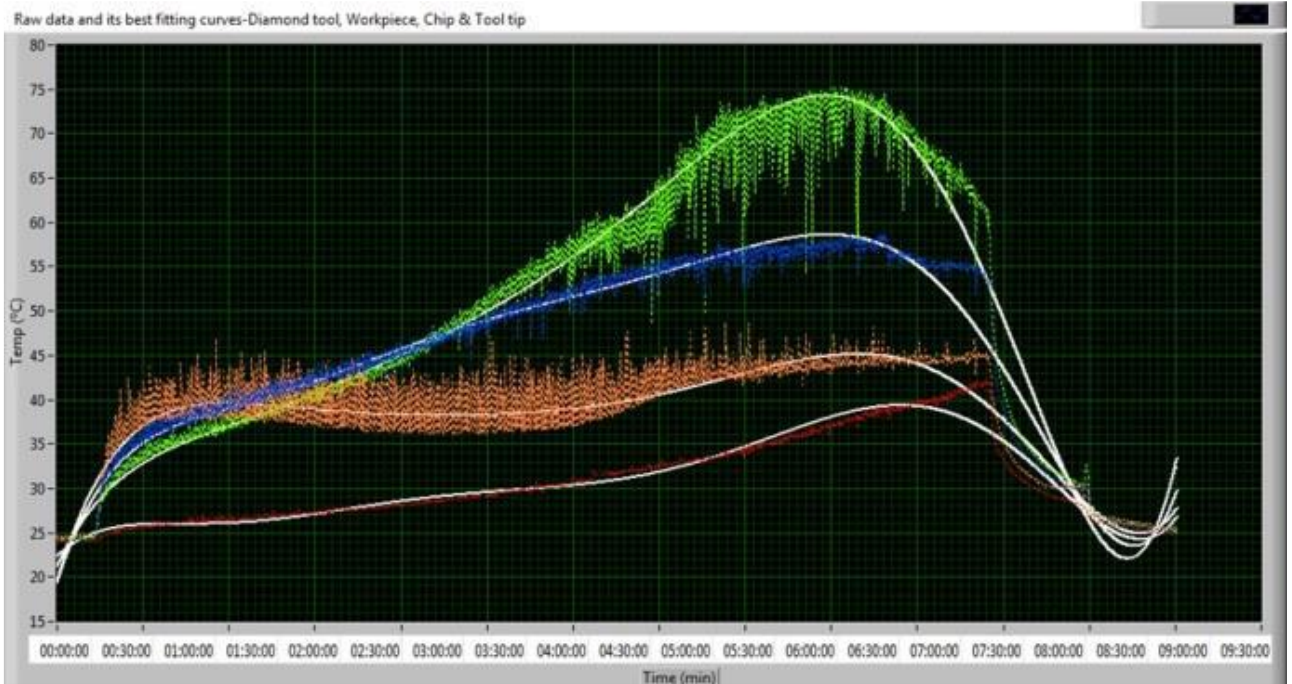
rezultatai parodė, kad peilio suapvalinimo spindulys, kaip ir pjovimo gylis didelės įtakos paviršiaus šiurkštumui neturi.

M.K. Guptas ir kt. [13] tyrė pagrindinio šliejimosi kampo įtaka titano paviršiaus kokybei. Savo darbe jie tyrė įrankius su 60, 75 ir 90 laipsnių kampais ir nustatė, kad geriausia titaną yra apdirbti peiliu, kurio pagrindinis šliejimo kampas yra 90 laipsnių. Kita vertus, jie nustatė, kad šio veiksnio įtaka yra maža palyginus su pjovimo greičio ar pastūmos įtaka.

### **1.3 Technologinės sistemos šiluminių deformacijų ir pjovimo zonos temperatūros įtaka**

Mechaninio apdirbimo metu visa technologinė sistema SIID šyla. Šis reiškinys kyla dėl apdirbimo metu išsiskiriančios šilumos, kurią sudaro: šiluma išsiskirianti peiliui pjaunant drožlę, judantys sujungimai, aušinimo skysčio pernešama šiluma, aplinkos temperatūra. Darbo pradžioje visi staklių mazgai yra aplinkos temperatūros, tačiau pradėjus apdirbimą visa technologinė sistema šyla, kol gaunamas šilumos kiekis prilygsta atiduodamam į aplinką šilumos kiekiui ir sistema tampa termiškai pusiausvyra.

Šiluminės ruošinio deformacijos kyla dėl šilumos išsiskiriančios apdirbimo metu. Bandymais nustatyta, kad apdirbant trapias medžiagas, tokias kaip titano lydiniai, didelė dalis šilumos pereina į ruošinį, ypač jei dirbama nedideliais pjovimo greičiais. Karščio pasiskirstymą tarp ruošinio, drožlės, įrankio ir įrankio pjaunančiosios briaunos apdirbant titano Ti-6Al-4V lydinį savo tyrime tyrė W. Savangsi ir kt. [14]. Jie naudojo labai mažus pjovimo režimus: *pjovimo gylis* ( $t$ ) = 10  $\mu\text{m}$ , *pastūma* ( $f$ ) = 5 mm/min, *pjovimo greitis* ( $v$ ) = 100 m/min. Žemiau esančiame grafike parodoma komponentų temperatūros priklausomybė nuo apdirbimo laiko (žr. 4 pav.) [14].



**4 pav.** Temperatūros pasiskirstymas tarp: deimantinio įrankio (mėlyna linija), ruošinio (raudona linija), drožlės (ruda linija), įrankio pjaunančiosios briaunos (žalia linija)[14].

Tyrimo metu buvo nustatyta, jog nors ir buvo naudojami sąlyginai maži pjovimo režimai, ruošinys įkaisdavo iki  $42.1^{\circ}\text{C}$ , o peilio pjaunančioji briauna iki  $74.3^{\circ}\text{C}$ , be to ilgai apdirbinėjant temperatūra vis augdavo. Ši aukšta pjovimo zonos temperatūra darbo metu ir sudaro pagrindines termines deformacijas, bei yra pagrindinis faktorius įtakojantis greitą įrankio nusidėvėjimą. A. R. Machadas ir kt. savo darbe, apie titano lydinių pjovimą, taip pat nurodė, kad aukšta pjovimo zonos temperatūra, o ypač ties pjovimo briauna, yra pagrindinis sunkumas apdirbant titano lydinis [15]. Kita vertus, savo tyrimo metu Suhailas A. D. atskleidė, kad aukštesnė ruošinio temperatūra, leidžia pasiekti geresnę paviršiaus kokybę dėl sumažėjusių pjovimo jėgų [16]. Todėl apdirbimo metu yra svarbu palaikyti tinkamą pjovimo zonos temperatūrą, kuri maksimaliai pagerintų paviršiaus kokybę, nesumažindama įrankio gyvavimo laiko.

Yra nemažai būdų kontroliuoti pjovimo zonos temperatūrai, kuri įtakoja ir šiluminę komponentų deformaciją, tokių kaip:

1. Pjovimo zonos aušinimas, tai leidžia sumažinti ruošinio temperatūrą tiek, kad šiluminė deformacija tampa nesvarbi.
2. Padidinti pjovimo greitį, nes tada didesnė dalis šilumos pereina į drožlę.
3. Aušinti ruošinius tarp operacijų.
4. Parinkti tinkamą įrankio medžiagą ir geometrinę formą.
5. Padidinti pastūmą ir sumažinti pjovimo gylį

Iš pasiūlytų pjovimo zonos temperatūros mažinimo ir palaikymo būdų, efektyviausias ir plačiausiai naudojamas yra aušinimo skysčio naudojimas. Deja, mechaninio apdirbimo metu į pjovimo zoną tiekiamas aušinimo skystis dėl šilumos mainų taip pat kaista, todėl jo temperatūra darbo pradžioje ir nusistovėjus šiluminei pusiausvyrai gali skirtis iki 25 laipsnių pagal Celsijų. Dėl šio aušinimo skysčio temperatūrų skirtumo skiriasi ir ruošinio, bei visų staklių mazgų temperatūra, ko pasekoje detalių matmenų dydis mašinos darbo pradžioje ir pabaigoje skiriasi. Žinoma, šis veiksnys didelę įtaką turi tada, kai apdirbimas vyksta automatinio būdu ir reikalingas didelis matmens tikslumas. Dirbant bandomųjų eigų metu, darbininkas-staklininkas gali bet kada koreguoti detalių matmenis ir įvertinti paklaidą.

Norint išvengti aušinimo skysčio temperatūros padidėjimo, galima taikyti šiuos būdus:

1. Didinti aušinimo skysčio rezervuaro dydį. Tuomet reikės daugiau šiluminės energijos įkaitinti aušinimo skysčiui.
2. Didinti skysčio lietimosi su aplinka plotą. Dėl geresnių šilumos mainų su aplinka aušinimo skystis greičiau atauš.
3. Įdiegti aušinimo skysčio aušintuvą (pavyzdžiui, kondicionierių), kuris palaikytų vienodą aušinimo skysčio temperatūrą darbo metu.

## 1.4 Virpesiai

Technologinės sistemos stabilumas yra vienas iš svarbiausių veiksnių siekiant tinkamos detalės kokybės. Kai stabilumas nėra pakankamas sistemoje SĮID kyla virpesiai, kurie sukelia periodinį pjovimo jėgų ir nupjaunamo sluoksnio storio kitimą. Šis kitimas labai pablogina paviršiaus kokybę ir sumažina įrankio patvarumą, o ypač yra pavojingas trapioms įrankinėms medžiagoms. Šiandien, pagrindinis būdas išvengti vibracijų apdirbimo metu yra tinkamų pjovimo režimų parinkimas. Šis metodas yra pagrįstas ankstesne patirtimi ar bandymais, kurių metu nustatomi netinkami apdirbimo režimai.

Nors virpesiai iš esmės yra žalingi pjovimo procesui, tačiau yra atvejų kai jie pagerina pjovimo procesą. Apdirbant plastiškas medžiagas žemo dažnio virpesiai ašies kryptimi gali būti naudojami drožlei laužyti. Gręžiant mažo skersmens skylės įrankiui gali būti suteikti mažos amplitudės ir didelio dažnio virpesiai, kurie sumažina trintį kontaktiniuose paviršiuose ir pagerina tepimo aušinimo skysčio patekimą į pjovimo zoną.

### 1.4.1 Mechaninio apdirbimo metu kylančių virpesių klasifikavimas

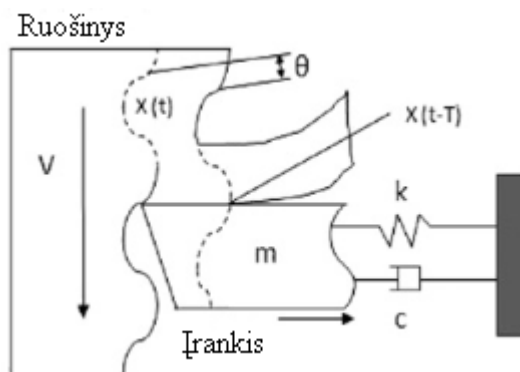
Mechaninio apdirbimo metu kylantys virpesiai yra skirstomi į tris kategorijas: išorinius, priverstinius ir savaime susižadinančius (autovirpesiai). Išoriniai virpesiai yra visi virpesiai kylantys aplink stakles. Šių vibracijų galima nepaisyti, nes staklės yra apsaugotos nuo išorinių vibracijų specialiomis platformomis.

Priverstinės vibracijos yra tam tikros periodiškai kintančios jėgos kurios kyla staklių darbo metu. Šių jėgų šaltiniai gali būti: sugedusios perdavos, geometrinės paklaidos staklių mechanizmuose, ašių nesutapimas, disbalansas, variklis, aukšto slėgio pompa ir kt. Šių virpesių priežastys dažniausiai gali būti lengvai rastos ir pašalintos.

Autovirpesiams atsirasti nereikalingos išorinės jėgos, jie kyla pjovimo proceso metu, kai nuo ruošinio yra pašalinama drožlė. Šios kategorijos virpesiai dar yra skirstomi į pirminius ir antrinius. Pirminiai autovirpesiai kyla dėl:

1. Terminių procesų pjovimo zonoje (pavyzdžiui, esant periodiniam auglio susidarymui ir irimui).
2. Netinkamų pjovimo režimų.
3. Nusidėvėjusių įrankių.
4. Trinties tarp įrankio pjovimo briaunos ir ruošinio.

Antriniai autovirpesiai kyla dėl banguoto detalės paviršiaus, gauto ankstesnių apdirbimų metu. Apdirbant netolygų detalės paviršių, atsiranda netolygios pjovimo jėgos ir dėl to kyla virpesiai, kaip parodyta 5 pav.[17].

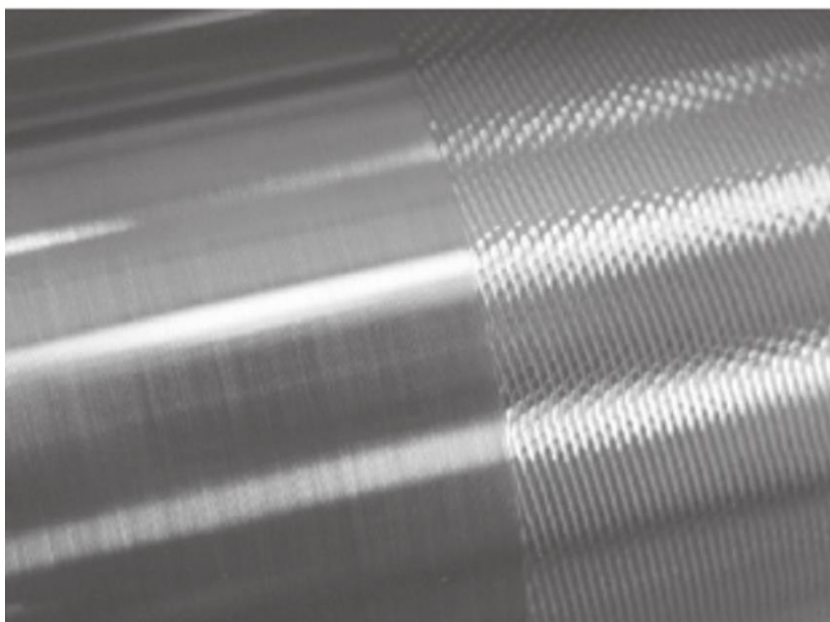


5 pav. Autovirpesių susidarymo schema [17]

Įrankio parametrai  $m$ ,  $k$  ir  $c$  yra įrankio masė, standumas ir virpesių slopinimo koeficientas. Šioje schemoje  $x(t)$  yra po apdirbimo gaunamas paviršius, o  $x(t-T)$  prieš tai buvęs paviršius. Fazių skirtumas  $\theta$  tarp paviršiaus banguotumo po ankstesnio apdirbimo ir dabartinio apdirbimo yra

pagrindinis faktorius lemiantis autovirpesių atsiradimą. Jei abiejų paviršių banguotumo kreivių fazės sutampa ( $\theta=0$ ), tai autovirpesių amplitudė nedidės ir procesas išliks stabilus. Jei į tekimo procesą žiūrėsime kaip į energijos mainus, kur į sistemą tiekiamas energijos kiekis yra lygus sunaudojamam energijos kiekiui, tai kai fazės sutampa, sistemoje nėra perteklinio energijos kiekio ir gaunamas stabilus pjovimo procesas. Bet kai fazės nesutampa ( $\theta\neq 0$ ), paviršiaus banguotumas auga, nes pjovimo įrankiui suteikiama energija yra didesnė nei reikalinga, kas galų gale iššaukia nestabilių pjovimo procesą. Dėl kilusių vibracijų drožlės storis nuolat kinta, o tai sukelia dideles periodiškai kintančias dinamines jėgas, kurių dažnis gali tapti artimas savajam sistemos virpesių dažniui ir sukelti rezonansą t. y. staigų virpesių amplitudės padidėjimą [17].

Antrinius autovirpesius galima atpažinti iš garso kylančio vibracijų metu, žymių ant apdirbto paviršiaus (žr. 6 pav.) [18] ir drožlių formos.



**6 pav.** Antrinių autovirpesių vaizdas [18]

Apdirbimas kilus antriniams autovirpesiams yra dažniausiai nepriimtinas, dėl suprastėjusios detalės paviršiaus kokybės ir jo metu kylančių didelių dinaminių jėgų, kurios gali sulaužyti įrankius ar staklių komponentus. Šie virpesiai yra patys žalingiausi, kadangi nėra iki galo ištirti, dėl sudėtingų procesų vykstančių drožlės atskyrimo metu. Jie taip pat turi būti tiriami atskirai skirtingiems pjovimo procesams, dėl šių priežasčių nėra universalus būdas, kuris padėtų jų išvengti.

## 1.4.2 Pjovimo įrankio virpesių įtaka detalės kokybei

Tekinimo metu įrankio vibracijos stipriai įtakoja detalės kokybės parametrus, todėl yra atlikta nemažai tyrimų norint išmatuoti virpesių įtaką detalės šiurkštumui ir matmens tikslumui. Toliau apžvelgsime keletą iš jų.

Virpesių įtaka detalės šiurkštumui savo darbe tyrė S. Y. Kassabas ir kt. [19]. Jie nustatė, kad pjovimo įrankio vibracijos stipriai įtakoja paviršiaus šiurkštumą. Kuo mažesnės vibracijos, tuo mažesnis paviršiaus šiurkštumas ir ši priklausomybė taip pat pasireiškia keičiant kitus pjovimo režimus, tokius kaip pastūma ar pjovimo greitis.

Risboodas ir kt. [20] savo tyrimo metu kūrė neuroniniais tinklais paremtą paviršiaus šiurkštumo ir matmens tikslumo nuspėjimo modelį. Šis modelis kaip įėjimo signalą naudojo pjovimo jėgas ir įrankio laikiklio vibracijas radialine kryptimi. Atlikus tyrimus, buvo konstatuotos šios išvados:

1. Tam, kad galėtum nuspėti paviršiaus šiurkštumą, užtenka tik akselerometru išmatuoti įrankio laikiklio vibracijas radialine kryptimi.
2. Apdirbant ne liaunus ruošinius ( $L/D < 6$ ) su pakankamo standumo staklėmis, pjovimo įrankio vibracijų įtaka matmens tikslumui yra sąlyginai maža.
3. Pjovimo jėga turi nedidelę įtaką paviršiaus šiurkštumui, bet turi didelę įtaką matmens tikslumui.

V. Upadhyasas ir kt. [21] matavo pjovimo įrankio virpesių amplitudės radialine, tangentine ir ašine kryptimis, apdirbant Ti-6Al-4V titano lydinį, įtaką paviršiaus šiurkštumui. Tyrimo metu jie nustatė, kad virpesiai radialine kryptimi labiausiai priklauso nuo pastūmos. Be to, šios krypties virpesiai labiausiai veikia paviršiaus kokybę, o kitos krypties virpesių įtaka yra maža palyginus su radialinės krypties virpesiais.

Išnagrinėjus duotus šaltinius, galima konstatuoti dvi išvadas: Pirma, paviršiaus šiurkštumas yra glaudžiai susijęs su įrankio virpesiais radialine kryptimi. Dėl šios priežasties modeliai, kurie prognozuoja paviršiaus šiurkštumą, įvertindami įrankio virpesius, yra daug tikslesni nei modeliai įvertinantys tik pjovimo režimus [22]. Antra, tekinimo proceso metu pjovimo įrankio vibracijų įtaka matmens tikslumui yra pakankamai nedidelė, jei kiti technologinės sistemos SIID komponentai yra standūs.

## 2 BANDYMUOSE NAUDOJAMA ĮRANGA IR METODIKA

Tyrimuose buvo naudojamas 6 mm skersmens titano lydinio Ti-6Al-4V arba Grade 5 strypas. Tai yra plačiausiai pasaulyje naudojamas titano lydinys, kuris sudaro apie 50 % iš viso pasaulyje sunaudojamo titano. Platus šio lydinio naudojimas sąlygojamas dėka daugybės jo privalumų, tokių kaip:

1. Gali būti termiškai apdorotas, taip padidinant lydinio stiprumą.
2. Galima suvirinti.
3. Tinkamas naudoti temperatūrose iki 315 °C.
4. Turi gerą stiprumo ir masės santykį.
5. Nėra sunkiai apdirbamas mechaniškai.
6. Biologiškai suderinamas su žmogaus audiniais (pavyzdžiui, gaminant implantus).
7. Dėl labai greitai susiformuojančio tankaus oksidų sluoksnio yra labai atsparus korozijai net ir chemiškai aktyvioje aplinkoje.

Dėl šių ir kitų savo savybių titano lydinys Ti-6Al-4V yra tinkamas naudoti aviacijos, medicinos, karinėje ir chemijos industrijose. Šios medžiagos cheminė sudėtis ir mechaninės savybės pateikiamos 2.1 ir 2.2 lentelėse [23].

**2.1 Lentelė.** Ti-6Al-4V cheminė sudėtis [23]

Medžiaga	Fe, %	C, %	N, %	O, %	H, %	Al, %	V, %	Ti, %
Ti-6Al-4V	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,015	5,5-6,75	3,5-4,5	Likusi dalis

**2.2 Lentelė.** Ti-6Al-4V mechaninės savybės [23]

Medžiaga	Stiprumo riba, $\sigma_{ub}$ , Mpa	Takumo riba, $\sigma_T$ , MPa	Santykinis pailgėjimas, %	Lydimosi temperatūra, °C	Takumo riba $\sigma_T$ , MPa	Tankis, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>
Ti-6Al-4V	≥ 895	≥ 828	10-15	1630-1650	Max.800	7700

Medžiagai apdirbti buvo naudojama įrankių gamintojo „Applitec“ paviršiaus tekimo plokštelė VCGT-110301-FN-X8-K20 (žr. 7 pav.) [24], jos viršūnės suapvalinimo spindulys yra 0,1 mm. Bandyams buvo parinkta ši plokštelė, nes tai yra dažniausiai naudojamas pjovimo įrankis





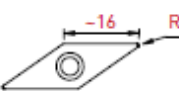
įmonėje ir rezultatai gauti su šia plokštele būtų plačiausiai pritaikomi gamyboje. O tokio mažo suapvalinimo spindulio plokštelės panaudojimas reikalingas, dėl labai mažų suapvalinimo spindulių detalėse, kurių būtų neįmanoma suformuoti su plokštele kurios suapvalinimo spindulys didesnis nei 0,1 mm.

[<<< MAIN INDEX](#)  
[< ISO Index](#)

**ISO-Line**

Plaquettes en métal dur  
VHM-Wendeplatten  
Solid carbide inserts

35° VCGT-X8°

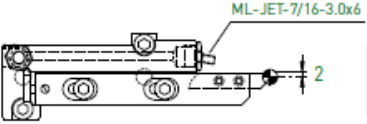
**VCGT FN-X8°**

R	Old ref.	Art. N°	PVD		K20	PVD	
			TIALN	TIN		HTA	K10
0.05	ISO-1630	VCGT-1103005-FN-X8	■	■	■	■	■
0.1	ISO-1631	VCGT-110301-FN-X8	■	■	■	■	■
0.2	ISO-1632	VCGT-110302-FN-X8	■	■	■	■	■
0.4	ISO-1634	VCGT-110304-FN-X8	■	■	■	■	■
0.05	ISO-1730	VCGT-1604005-FN-X8	■	■	■	■	■
0.1	ISO-1731	VCGT-160401-FN-X8	■	■	■	■	■
0.2	ISO-1732	VCGT-160402-FN-X8	■	■	■	■	■
0.4	ISO-1734	VCGT-160404-FN-X8	■	■	■	■	■

7 pav. Tekinimo plokštelės vaizdas [24]

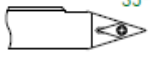
Šiai plokštelei tvirtinti staklėse buvo naudojamas to pačio gamintojo laikiklis ML16-DECO13-JET [24] ir kotelis ML16A-SVVCN11 7 [24], jų abiejų vaizdas su katalogu numeriais pateikiamas 8 pav.. Šis pjovimo įrankio laikiklis buvo naudojamas, nes dėl savo konstrukcijos gali nukreipti aukšto slėgio tepalo čiurkšlę tiesiai į pjovimo zoną, taip pašalindamas iš jos drožles ir užtikrindamas tolygią temperatūrą viso proceso metu.

Laikiklis



Jet

Kotelis



ML-JET-7/16-3.0x6

2

Type	Art. N°	Porte-outils	Pages
Jet	ML16-DECO13-JET	ML16	> 6.27
Duo	ML16-DECO13-DUO	ML16	> 6.27

ML12	ML16	ML20	
ML12A-SVVCN11	ML16A-SVVCN11	-	ISO-Line VC...1103..
ML12F-SVVCN11	ML16F-SVVCN11	-	

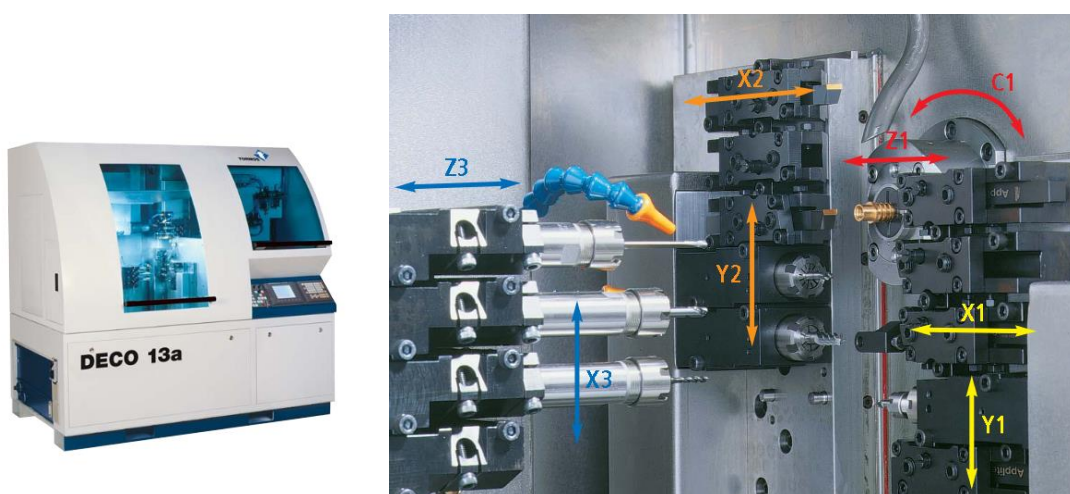
8 pav. Įrankio laikiklio ir kotelio vaizdas kartu su katalogo numeriais [24]

Detalei bazuoti buvo naudojama „Schlenker“ gamybos kreipiančioji įvorė F605 Ø6mm UP. Parinkta buvo ši kreipiančioji įvorė, nes jos matmenų tikslumas yra 0,02 mm ir ji yra skirta tiksliam apdirbimui. Jos vaizdas yra pateikiamas 9 pav.[25].



**9 pav.** Kreipiančiosios įvorės F605 Ø6mm UP vaizdas [25]

Bandymai buvo atliekami ruošinius apdirbant su metalo apdirbimo staklių gamintojo „Tornos“ CNC programinio valdymo apdirbimo centru Deco 13a ( žr. 10 pav.)[26]. Šių staklių pilna techninė charakteristika yra pateikiama 1 priede [26].



**10 pav.** CNC programinio valdymo apdirbimo centro Tornos Deco 13 a bendras vaizdas ir ašių kinematinė schema[26]

## **2.1 Taguchi metodo naudojimas apdirbimo režimų optimizavimui**

Taguchi metodas naudojamas rasti tokioms tiriamų parametrų vertėms, su kuriomis produktas ar procesas taptų kuo mažiau priklausomas nuo išorinių, procese nekontroliuojamų veiksnių. Šis metodas yra paremtas ortogonaliniais masyvais(OA), kurie leidžia efektyviai tirti kelis parametrus vienu metu. Šiame tyrime, šis metodas naudojamas tam, kad išsiaiškinti kiekvieno parametro didžiausią vertę, su kuria dar galima pasiekti reikiamą detalės kokybę ir nustatyti kokia yra to parametro įtaka galutiniam rezultatui.

Taguchi siūlo signalo ir triukšmo (S/N) santykį kaip objektinę funkciją ortogonalinės matricos eksperimentams. Signalo ir triukšmo santykis yra naudojamas matuoti kokybės charakteristikoms ir parodo kokia yra tikimybė, kad nekontroliuojami veiksniai per daug nenulems

galutinio rezultato. Naudojant šį metodą S/N santykis yra skirstomas į 3 tipus: mažesnis yra geresnis, didesnis yra geresnis ir nominalus yra geresnis. Kurį tipą pasirinkti priklauso nuo tiriamo dydžio norimos gauti vertės. Vidurkių analizė (ANOM) paremta S/N santykiu yra skirta geriausių tiriamų veiksnių vertėms rasti. Geriausia parametro vertė yra tokia, su kuria gaunamas didžiausias S/N santykio dydis iš visų eksperimente tiriamų parametro verčių. Skirtumų analizė (ANOVA) parodo tiriamų parametrų santykį vienas kito atžvilgiu galutiniam rezultatui. Šis dydis yra skaičiuojamas pagal S/N santykius tam, kad gauti procentinę kiekvieno parametro įtaką galutiniam rezultatui.

### 3 APDIRBIMO REŽIMŲ ĮTAKOS MATMENS TIKSLUMUI IR PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMUI TYRIMAS

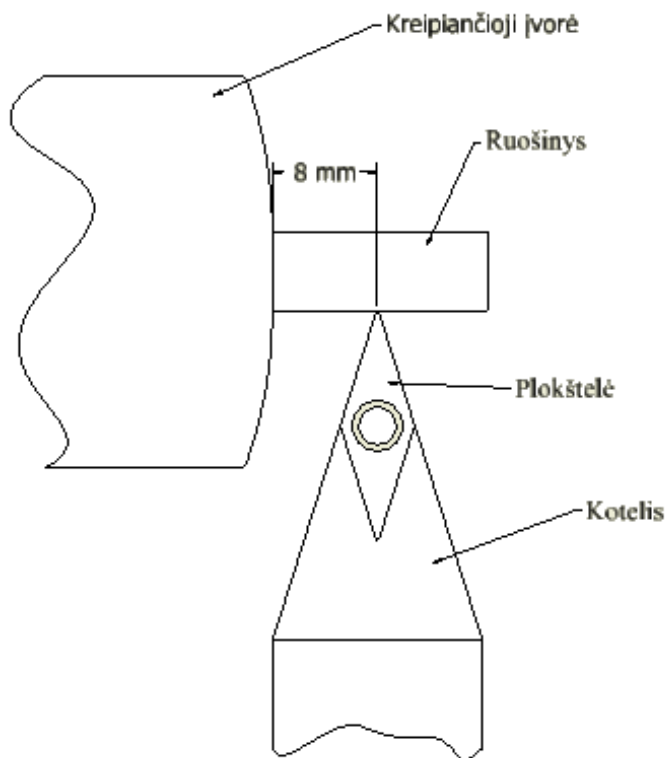
Pirmame bandyme buvo tiriama tokių veiksnių kaip: pjovimo greitis ( $V_c$ ), pastūma ( $f$ ), pjovimo gylis ( $t$ ), peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės ( $L$ ) įtaka detalės matmens tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui. Toliau paaiškinama kodėl buvo parinktos būtent tokios veiksnių reikšmės [24]:

Pjovimo greitis pirmame lygyje buvo parinktas pagal plokštelės gamintojo kataloge [24] rekomenduojamą mažiausią vertę, o trečiame lygyje pagal didžiausią rekomenduojamą vertę. Ketvirtame lygyje parinktas didesnis greitis nei rekomenduoja, nes jei rezultatai parodytų, kad pjovimo greitis neturi didelės įtakos, būtų galima apdirbinėti su didesniu pjovimo greičiu, taip sumažinant detalės apdirbimo laiką

Pastūma kaip ir pjovimo greitis pirmame lygyje buvo parinkta pagal mažiausią rekomenduojamą vertę, tačiau, nors ir maksimali rekomenduoja vertė yra 0,12 mm/aps, ketvirtame lygyje parenkama vertė yra 0,04 mm/aps. Tai yra grindžiama tuo, kad plokštelės suapvalinimo spindulys yra mažas (0,1 mm) ir jei pastūma bus artima plokštelės suapvalinimo spinduliui labai padidės detalės paviršiaus šiurkštumas.

Pjovimo gylis parenkamas pagal rekomendacijas glotniam apdirbimui, kur pirmame lygyje yra mažiausia rekomenduoja vertė, o ketvirtame lygyje didžiausia. Antro ir trečio lygio vertės parenkamos kaip tarpinės vertės tarp didžiausios ir mažiausios.

Peilio viršūnės atstumo nuo kreipiančiosios įvorės reikšmė pirmame lygyje yra parenkama pagal mažiausią atstumą, kuris gali būti pasiektas su bandyme naudojama plokštele ir jai skirtu tokio tipo laikikliu. Šio parametro vertės tolesniuose lygiuose buvo parinktos šį atstumą didinant po 2 mm. Tirti šį dydį buvo pasirinkta, nes priešingai nei klasikinėse tekimo staklėse, kuriose pjovimo įrankis pjaudamas drožlę slenka išilgai ruošinio, čia ruošinys slenka išilgai pjovimo įrankiu. Praktikoje dažnai reikia apdirbti ilgesnes nei 10 mm ilgio detales keliais praėjimais, todėl norima iširti iki kiek padidinus šį atstumą jis dar neturės pakankamai didelės įtakos kokybei, naudojant 6 mm skersmens Ti-6Al-4V strypą. Šio dydžio paaiškinamoji schema yra pateikiama 11 pav.. Šis atstumas buvo matuojamas su specialiai bandyme naudojamoms staklėms pritaikyta tekimo peilio viršūnės koordinatinių matavimo mašina ( žr.12 pav.) [26].



**11 pav.** Tekinimo Peilio viršūnės atstumo nuo kreipiančiosios įvorės paaiškinamoji schema



**12 pav.** Tekinimo peilio viršūnės koordinačių matavimo mašina [26]

Visi bandyme tirti apdirbimo parametrai ir jų vertės lygiuose pateikiamos 2.3 lentelėje.

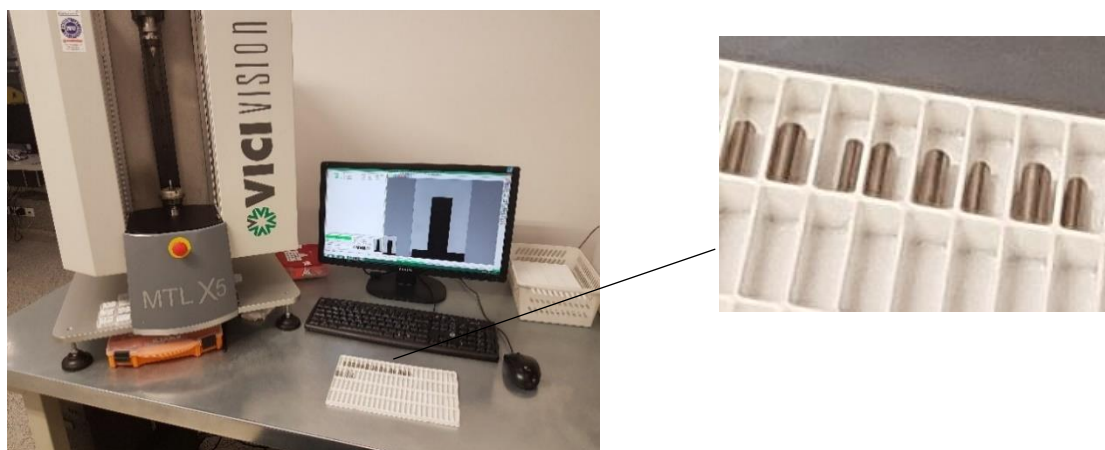
**2.3 Lentelė.** Apdirbimo parametrai ir jų vertės naudotos bandyme

Parametras	Matavimo vienetai	Žymėjimas	Lygiai			
			1	2	3	4
Pjovimo greitis	m/min	$V_c$	30	45	60	75
Pastūma	mm/aps	$f$	0,01	0,02	0,03	0,04
Pjovimo gylis	mm	$t$	0,1	0,4	0,7	1,0
Peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės	mm	$L$	8	10	12	14

Bandymo eiga buvo suplanuota naudojant Taguchi metodą skirtą apdirbimo režimų optimizavimui, naudojant ortogonalinį masyvą  $L_{16}$  (žr. 2.4 lentelė). S/N santykiui apskaičiuoti parenkama „mažiau yra geriau“ skaičiavimo metodika, kai gaunamo rezultato mažesnė reikšmė yra geresnė. Visi skaičiavimai buvo atlikti naudojant „MINITAB 18“ kompiuterinę programą.

Kiekvieno parametro kiekvienam lygiui buvo atlikta jo įtakos matmens tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui analizė apskaičiuojant jo S/N santykį. Po to panaudojant skirtumų analizę (ANOVA) buvo nustatyta kiek tiksliai, kiekvienas iš parametrų nulemia matmens tikslumą ir paviršiaus šiurkštumą.

Cilindriškumo paklaida buvo matuojama su optine matavimo mašina ViciVision MTL X5, šios matavimo mašinos ir bandinių vaizdas pateikiamas 13 pav.. Ši mašina sukdamą detalę 360 laipsnių kampu pamatuoja jos diametrą 500 skirtingų vietų ir pateikia skirtumą tarp mažiausios išmatuotos vertės ir didžiausios. Šio parametro matavimo nustatymus ir pagal juos gaunamą rezultatą kompiuterinės programos „ViciVision“ aplinkoje vaizdas pateikiamas 2 priede Kad užtikrinti matavimo tikslumą, kiekvieno bandinio cilindriškumo paklaida buvo matuojama 3 skirtingose vietose ir apskaičiuojamas vidurkis, kuris ir buvo naudojamas tolesniuose skaičiavimuose. Matavimo mašinos pateikiamos ataskaitos pavyzdys pateikiamas 4 priede.



**13 pav.** ViciVision MTL X5 matavimo mašinos ir bandinių vaizdas

Paviršiaus šiurkštumas buvo matuojamas su paviršiaus kokybės matavimo prietaisu INNOVATEST TR220, šio prietaiso ir matuojamo bandinio vaizdas pateikiamas 14 pav., o prietaiso techninė charakteristika pateikiama 5 priede [27]. Paviršiaus kokybei matuoti buvo pasirinktas parametras  $R_a$ , nes tai yra vienas iš dažniausiai praktikoje naudojamų dydžių ir jis yra nurodomas įmonės, kurioje atliekami bandymai paviršiaus kokybės reikalavimuose. Kad užtikrinti matavimo tikslumą, kiekvieno bandinio paviršiaus šiurkštumas buvo matuojamas 5 mm ilgio intervaluose 3 skirtingose vietose ir apskaičiuotas vidurkis buvo naudojamas tolesniuose skaičiavimuose.



**14 pav.** Paviršiaus kokybės matavimo prietaiso INNOVATEST TR220 ir bandinio vaizdas

Gauti cilindriškumo paklaidos ir paviršiaus kokybės pagal Ra rezultatų vidurkiai kartu su bandiniams naudotais apdirbimo režimais ir apskaičiuotomis S/N vertėmis pateikiami 2.4 lentelėje.

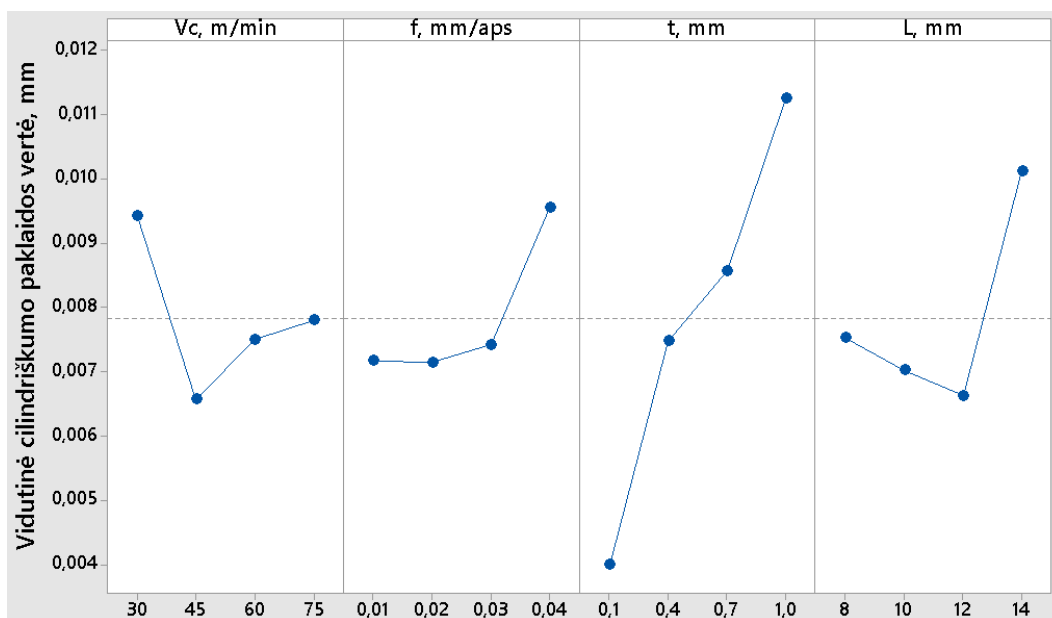
**2.4 Lentelė.** Bandyje naudotų apdirbimo režimų, gautos cilindriškumo paklaidos, paviršiaus šiurkštumo ir jų S/N santykių lentelė

Bandinio Nr.	$V_c$ , m/min	$f$ , mm/aps.	$t$ , mm	$L$ , mm	Cilindriškumo paklaida, mm	S/N santykis cilindriškumo paklaidai $\eta_1$ , dB	Paviršiaus šiurkštumas pagal $R_a$ , $\mu\text{m}$	S/N santykis paviršiaus šiurkštumui $\eta_2$ , dB
1	30	0,01	0,1	8	0,0041	47,744	0,345	9,252
2	30	0,02	0,4	10	0,0073	42,734	0,478	6,405
3	30	0,03	0,7	12	0,0080	41,938	0,691	3,206
4	30	0,04	1	14	0,0183	34,751	0,920	0,721
5	45	0,01	0,4	12	0,0058	44,731	0,489	6,208
6	45	0,02	0,1	14	0,0038	48,404	0,459	6,764
7	45	0,03	1	8	0,0090	40,915	0,597	4,481
8	45	0,04	0,7	10	0,0077	42,270	0,838	1,532
9	60	0,01	0,7	14	0,0096	40,355	0,541	5,341
10	60	0,02	1	12	0,0085	41,412	0,575	4,802
11	60	0,03	0,1	10	0,0039	48,179	0,461	6,726
12	60	0,04	0,4	8	0,0080	41,938	0,783	2,128
13	75	0,01	1	10	0,0092	40,724	0,414	7,653
14	75	0,02	0,7	8	0,0090	40,915	0,441	7,118
15	75	0,03	0,4	14	0,0088	41,110	0,753	2,464
16	75	0,04	0,1	12	0,0042	47,535	0,816	1,763

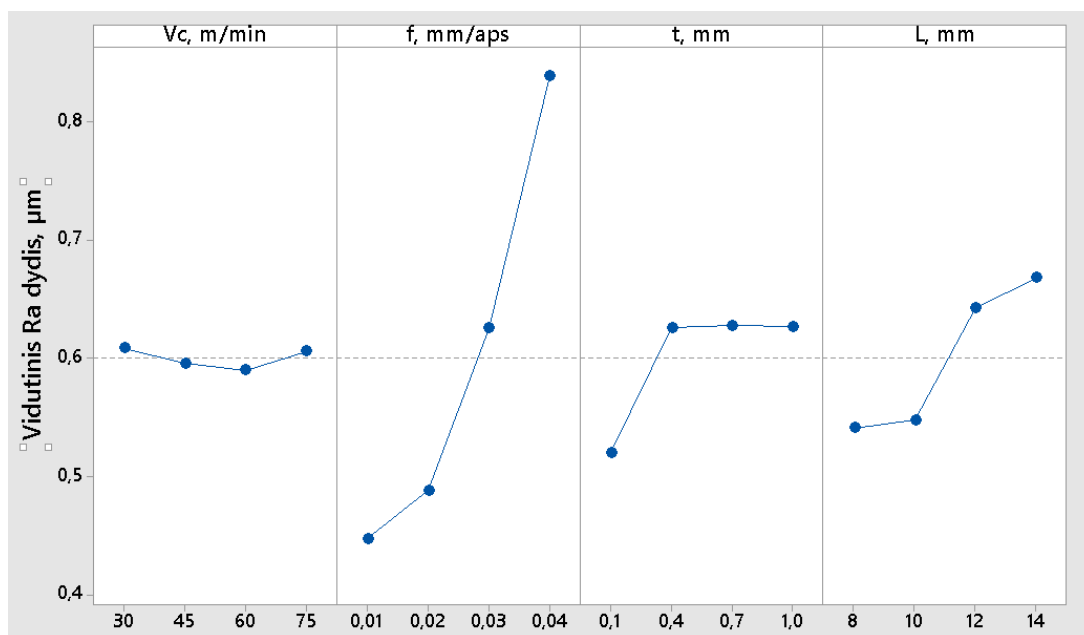


### 3.1 Bandymo rezultatų aptarimas

Šioje darbo dalyje yra atliekama vidurkių analizė (ANOM) paremta S/N santykiu, tam kad nustatyti parametrų vertes su kuriomis yra gaunami geriausi rezultatai. Šios analizės grafikai cilindriškumo paklaidai yra pateikiami 15 pav., o paviršiaus šiurkštumui 16 pav.. Parametro vertė su mažiausia vidutine verte ir yra ta, su kuria bus gaunamas geriausias rezultatas.



15 pav. Vidutinės kiekvieno parametro cilindriškumo paklaidos vertės apskaičiuotos pagal S/N santykį



16 pav. Vidutinės kiekvieno parametro paviršiaus šiurkštumo vertės apskaičiuotos pagal S/N santykį

Atlikus ANOM analizę galima pastebėti, kad mažiausia cilindriškumo paklaida bus gaunama kai: *pjovimo greitis* ( $V_c$ ) = 45 m/min, *pastūma* ( $f$ ) = 0,02 mm/aps, *pjovimo gylis* ( $t$ ) = 0,1 mm, *peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės* ( $L$ ) = 12 mm. O paviršiaus šiurkštumas mažiausias bus su:  $V_c = 60$  m/min,  $f = 0,01$  mm/min,  $t = 0,1$ ,  $L = 8$  mm.

Norint ištirti kiek kiekvienas iš parametrų nulemia galutinį rezultatą yra atliekama skirtumų analizė (ANOVA) paremta tuo pačiu S/N santykiu. Darbe tiriamiems parametrams ANOVA yra atlieka apskaičiuojant parametro įtaką galutiniam rezultatui pagal šią formulę:

$$\eta_i = \frac{\sum \delta}{\delta_i} * 100\%; \quad (4)$$

Čia:

$\eta_i$  – atitinkamo parametro įtaka galutiniam rezultatui, %;

$\delta$  – atitinkamo parametro dispersija;

$\sum \delta$  – Visų parametrų kartu su paklaida dispersijų suma.

Skirtumų analizės rezultatai cilindriškumo paklaidai kartu su kiekvieno parametro dispersija ir vidurkio kvadratu yra pateikiami 2.5 lentelėje, o paviršiaus šiurkštumui 2.6 lentelėje.

**2.5 Lentelė.** Skirtumų analizės rezultatai cilindriškumo paklaidai

Parametras	Laisvės laipsniai	Dispersija	Vidurkis pakeltas kvadratu	Parametro įtaka, %
$V_c$	3	0,000017	0,00006	9,34
$f$	3	0,000016	0,00005	8,79
$t$	3	0,000108	0,00036	59,34
$L$	3	0,000030	0,0001	16,48
Paklaida	3	0,000011	0,00004	6,04
Viso	15			

**2.6 Lentelė.** Skirtumų analizės rezultatai paviršiaus šiurkštumui

Parametras	Laisvės laipsniai	Dispersija	Vidurkis pakeltas kvadratu	Parametro įtaka, %
$V_c$	3	0,0657	0,0219	0,07
$f$	3	74,0407	24,6802	75,92
$t$	3	9,6235	3,2078	9,87
$L$	3	12,4097	4,1366	12,72
Paklaida	3	1,388	0,4627	1,42
Viso	15			

Atlikus ANOVA analizę galima pastebėti, kad didžiausią įtaką cilindriškumo paklaidai turi pjovimo gylis (59,34 %), o paviršiaus šiurkštumui pastūma (75,92 %).

### 3.1.1 Cilindriškumo paklaida

Iš ANOVA analizės galima pastebėti, kad pjovimo greitis pakankamai nedaug nustato cilindriškumo paklaidos dydį (9,34 %). Iš 15 pav. esančio grafiko galima pastebėti, kad esant mažam pjovimo greičiui (30 m/min) cilindriškumo paklaida yra didžiausia, tai gali būti dėl mažos temperatūros pjovimo zonoje ir dėl to kylančių didesnių jėgų. Kaip ir buvo galima tikėtis, esant vidutinei plokštelių gamintojo rekomenduojamai pjovimo greičio vertei (45 m/min) gaunama mažiausia cilindriškumo paklaida. Didinus pjovimo greitį paklaida didėja, todėl norint šį dydį kuo mažesni, geriausia yra naudoti vidutinę rekomenduojamą vertę.

Pastūmos įtaka cilindriškumo paklaidos dydžiui yra panaši kaip ir pjovimo greičio (8,76 %), tačiau priklausomybė yra daug paprastesnė nei pjovimo greičio: kuo didesnė pastūma tuo didesnė cilindriškumo paklaida. Iš 15 pav. esančio grafiko galim pamatyti, kad iki 0,03 mm/aps pastūmos cilindriškumo paklaida beveik nedidėja, tačiau toliau didinant pastūmą cilindriškumo paklaida pradeda sparčiai augti. Šis reiškinys kyla, nes dėl padidėjusių pjovimo jėgų strypo standumas tampa nepakankamas, o tai sukelia nestabilumą pjovimo procese.

Pjovimo gylis yra pagrindinis parametras, kuris nulemia cilindriškumo paklaidos dydį (59,34%), kuo didesnis pjovimo gylis tuo didesnė cilindriškumo paklaida ir ši priklausomybė daug ryškesnė nei tarp pastūmos ir cilindriškumo paklaidos. Iš 15 pav. esančio grafiko galima pamatyti, kad net ir nedidelis pjovimo gylio padidėjimas ( per 0,3 mm) stipriai padidina cilindriškumo paklaidos dydį.

Peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės yra antras pagal svarbumą parametras nustatantis cilindriškumo paklaidos dydį ( 16,48%). Iš 15 pav. galima pamatyti šiek tiek nelogišką priklausomybę tarp šių dviejų dydžių. Tai galima paaiškinti dėl matavimo paklaidos (kuri su optine

matavimo mašina ViciVision MTL X5 yra  $\approx 0,002$  mm). Pagal grafiką didinant L iki 12 mm cilindriškumo paklaida mažėja, tačiau labai nedaug (0,001 mm lyginant su esančia ties  $L=8$  mm). O pasiekus L vertę lygią 14 mm cilindriškumo paklaida pradeda sparčiai didėti, tai galima paaiškinti sumažėjusiu strypo standumu. Viską įvertus galima teigti, kad L parametras turi nedaug įtakos cilindriškumo paklaidai iki tam tikros vertės, apdirbant 6 mm skersmens Ti-6Al-4V strypą su bandyme naudojamais įrankiais šis atstumas yra apie 12 mm.

### 3.1.2 Paviršiaus šiurkštumas

Iš ANOVA analizės galima pastebėti, kad pjovimo greitis labai mažai įtakoja paviršiaus šiurkštumą (0,07%). Iš 16 pav. esančio grafiko, galima pastebėti, kad esant mažam pjovimo greičiui (30 m/min) gaunamas didžiausias paviršiaus šiurkštumas ir jis mažėja didinant pjovimo greitį. Tai galima paaiškinti dėl pjovimo zonos temperatūros, kuri didėja, kai didėja pjovimo greitis. Ši padidėjusi temperatūra suminkština medžiagą pjovimo zonoje ir tampa lengviau atskirti drožlę nuo ruošinio. Tačiau pjovimo greitį galima didinti tik iki tam tikros ribos, bandyme esančiomis sąlygomis, tai yra didžiausias rekomenduojamas pjovimo greitis (60 m/min).

Iš skirtumų analizės galima pastebėti, kad pastūma yra pagrindinis parametras, kuris nustato paviršiaus šiurkštumą (75,92 %). Trumpai tariant, kuo didesnė pastūma, tuo didesnis paviršiaus šiurkštumas. Iš 16 pav. esančio grafiko galima pastebėti, kad ši pastūmos- paviršiaus šiurkštumo priklausomybė didėja eksponentiškai, kitaip tariant jei iš pradžių padidinus pastūmą, paviršiaus šiurkštumas padidėdavo nedaug, tai ją didinant toliau, net ir nedidelis pastūmos padidėjimas iššaukia didelį paviršiaus šiurkštumo padidėjimą.

Iš 16 pav. esančio grafiko galima pastebėti, kad mažas pjovimo gylis (0,1 mm) leidžia pasiekti mažą paviršiaus šiurkštumą ( $\approx 0,5$   $\mu\text{m}$ ), tačiau net ir nedaug jį padidinus (iki 0,3 mm) paviršiaus šiurkštumas nemažai padidėja. Žinoma, iš to paties grafiko galima pastebėti ir tai, kad toliau didinant pjovimo gylį paviršiaus šiurkštumas beveik nesikeičia, tai patvirtina ir ANOVA analizė, kuri parodo palyginus nedidelę šio parametro įtaką paviršiaus šiurkštumui (9,87 %).

Kaip ir su cilindriškumo paklaida peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės yra antras pagal svarbumą parametras nustatantis gaunamą paviršiaus kokybę (pagal skirtumų analizę 12,72 %). Iš 16 pav. esančio grafiko galima pamatyti, kad jei peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės neviršija 10 mm, paviršiaus šiurkštumas keičiasi nedaug, tačiau jei atstumą toliau didinsime jis pradeda sparčiai didėti. Tai įvyksta, nes padidėja peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės, sumažėja strypo standumas ir jo galimybė išlaikyti stabilumą veikiant jėgoms, kylantioms pjovimo proceso metu. Norint gauti kuo mažesnę paviršiaus šiurkštumą, bandyme esančiomis sąlygomis šis atstumas neturėtų būti didesnis nei 10 mm.

## 4 MATMENS VERTĖS PRIKLAUSOMYBĖS NUO AUŠINIMO SKYSČIO TEMPERATŪTOS TYRIMAS

Šioje darbo dalyje, bus tiriama kaip keičiasi detalės matmens vertė keičiantis aušinimo skysčio temperatūrai, kai staklės dirba automatiniu režimu. Iš staklių buvo imamos detalės ir matuojama staklių aušinimo skysčio temperatūra. Tuomet detalės buvo matuojamos su matavimo mašina ViciVision MTL X5 ir vertės surašomos į lentelę.

Bandyme naudojamas tepimo - aušinimo skystis – emulsija Blaser Swisslube. Šis aušinimo skystis naudojamas įmonėje, kurioje buvo atliekamas bandymas, o įmonė jį pasirinko nes jis yra tinkamas naudoti medicinos pramonėje. Šis tepalas taip pat naudojamas rankinių laikrodžių ir orlaivių pramonėje. Šio tepimo-aušinimo skysčio privalumai: švaresnė darbo aplinka, geresnė paviršiaus kokybė, ilgesnis įrankių tarnavimo laikas, 90% sudėties sudaro organinės medžiagos, todėl mažai kenksmingas odai. Staklių darbinės zonos vaizdas tekimo metu pateikiamas 18 pav..

Aušinimo skysčio temperatūra buvo matuojama su tepimo-aušinimo skysčio kondicionieriumi „Marksa SA CSW 200“, kurį sudaro 2 dalys: išorinė dalis pavaizduota 17 pav. ir staklių viduje esantis radiatorius. Bandymo metu kondicionierius buvo įjungtas tik temperatūrai matuoti, savo pirminės, aušinimo, funkcijos neatliko, nes tai būtų iškreipę duomenis. Gauti bandiniai buvo matuojami su optine matavimo mašina ViciVision MTL X5 (žr. 13 pav.) trijose skirtingose vietose ir apskaičiuojamas vidurkis.



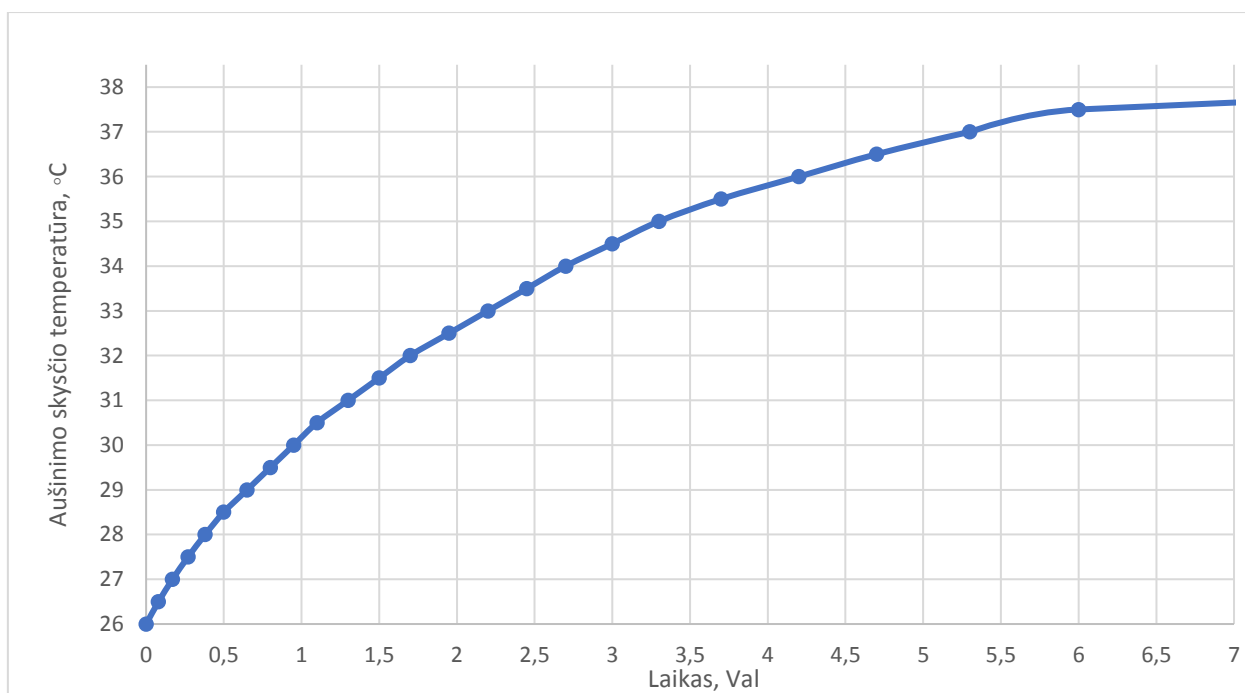
**17 pav.** Tepalo aušintuvas Marksa SA CSW 200



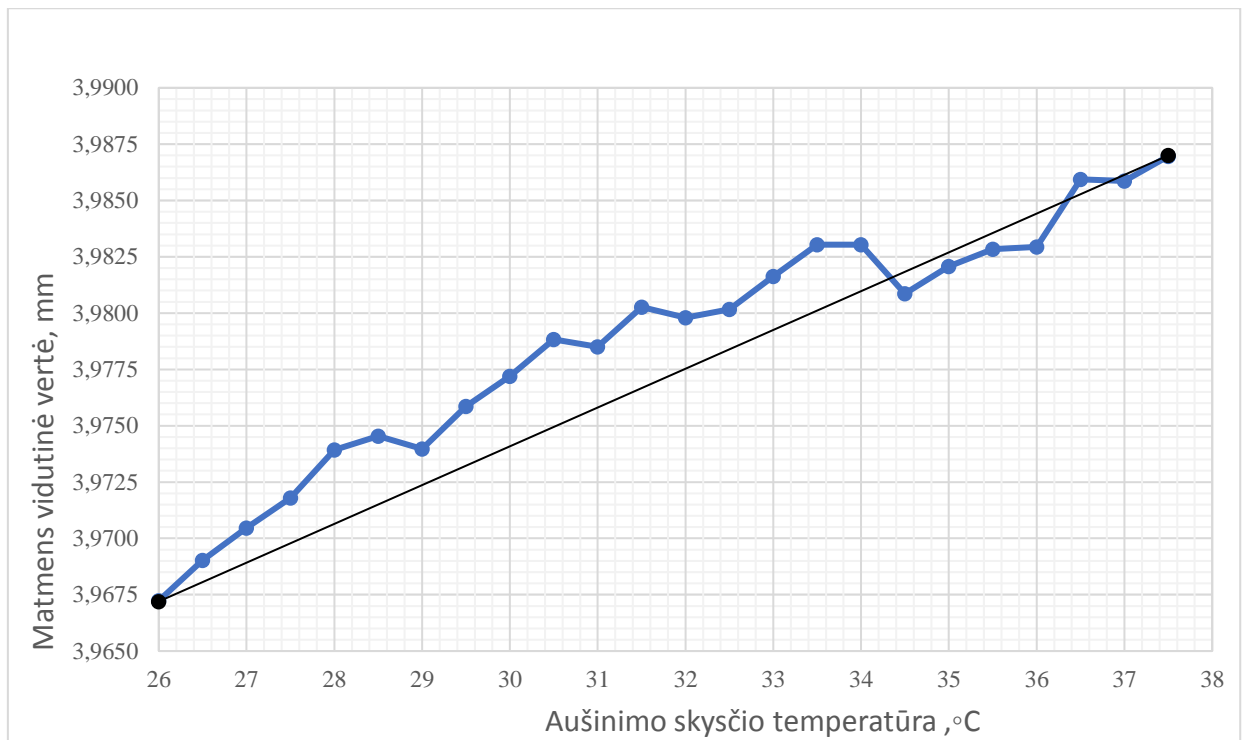
**18 pav.** Staklių darbinės zonos vaizdas tekimo metu

## 4.1 Bandymo eiga ir rezultatai

Bandymas prasidėjo nuo staklių aušinimo skysčio atvėsinimo iki kambario temperatūros. Kai aušinimo skystis atvėso, buvo įjungtas staklių aušinimo skysčio siurblys ir jis pradėjo cirkuliuoti staklių viduje, tuomet buvo pagamintos kelios detalės, tam kad pjovimo zonos temperatūra pakiltų. Kol visa tai buvo atlikta, aušinimo skysčio temperatūra pakilo iki 26°C. Bandymo metu staklės buvo paleistos gaminti pilnai automatiniu ciklu, todėl nebuvo jokių pauzių gamybos procese. Kaskart aušinimo skysčio temperatūrai pakilus 0,5°C, buvo imamas bandinys ir išmatuojamas jo skersmuo jį atsukus į tokią poziciją, kurioje bus mažiausia matuojamo matmens reikšmė. Bandymas buvo atliekamas iki kol beveik nusistovėjo šiluminė pusiausvyra ir laikas kol aušinimo skysčio temperatūra pakyla per 0,5 °C tapo lygus kelioms valandoms (žr. 19 pav.). Kadangi staklės gamino įmonės gaminius tai ir po bandymo jos toliau veikė pilnai automatiniu ciklu. Pamatavus aušinimo skysčio temperatūrą praėjus nuo bandymo 26 val., ji buvo lygi 41,2 °C, taigi laikas iki kol temperatūra pakils per 0,5°C tapo lygus  $\approx 3,71$  val.. Gautos bandinių matmenų reikšmės yra pateikiamos 20 pav. kaip mėlyna linija.



19 pav. Aušinimo skysčio temperatūros priklausomybė nuo laiko



**20 pav.** Matmens vertės priklausomybės nuo aušinimo skysčio temperatūros grafikas. Bandymo metu gauti bandinių matmenys (mėlyna linija), prognozuojamos matmens vertės (juoda linija)

Iš 20 pav. esančio grafiko galima spręsti, kad matmens vertės pokyčio priklausomybę nuo aušinimo skysčio temperatūros gana gerai apibrėžtą tiesinę funkciją. Kreivė gauta su žemiau esančia funkcija yra pateikiama 20 pav. esančiame grafike kaip juoda linija.

$$\Delta x = a\Delta T = 0,001722 * 10^{-6}\Delta T; \quad (5)$$

Čia:

$\Delta x$  – matmens reikšmės pokytis, m;

$\Delta T$  – aušinimo skysčio temperatūrų skirtumas.

Formulėje esanti konstanta ( $a = 0,001722 * 10^{-6}$ ) buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$a = \frac{T_{max} - T_{min}}{D_{max} - D_{min}} = \frac{37,5 - 26}{3,987 * 10^{-3} - 3,967210^{-3}} = 1,722 * 10^{-6}; \quad (6)$$

Čia:

$T_{max}$  – Didžiausia aušinimo skysčio temperatūra bandymo metu, °C;

$T_{min}$  – Mažiausia aušinimo skysčio temperatūra bandymo metu, °C;

$D_{max}$  – bandinio matmuo esant didžiausiai aušinimo skysčio temperatūrai, m;

$D_{min}$  - bandinio matmuo esant mažiausiai aušinimo skysčio temperatūrai, m.

Naudojant 5 formulėje pasiūlytą funkciją didžiausias skirtumas tarp apskaičiuotos ir bandymų metu gautos reikšmės yra  $3,8 * 10^{-6}$  mm. Kadangi, detalių matmens tikslumo reikalavimai yra  $\pm 0,005$  mm, ši metodika padėtų išvengti broko automatinės gamybos pradžioje. Tačiau, ši metodika neveiks, jei bus pertraukų gamybos procese, nes metalinės staklių dalys atvėsta daug greičiau nei aušinimo skystis. Norint toliau naudoti šią metodiką, reiktų įjungti aušinimo skysčio cirkuliaciją staklių viduje ir palaukti kol susivienodins staklių darbinėje dalyje esančių komponentų temperatūros.



## 5 TEKINIMO ĮRANKIŲ VIBRACIJŲ PRIKLAUSOMYBĖS NUO NUDILIMO DYDŽIO IR TIPO TYRIMAS

Norint užtikrinti kuo stabilesnę ir reikalaujančią kuo mažiau žmogaus priežiūros gamybą, reikia tokio matavimo metodo, kuris leistų identifikuoti nudilusį įrankį nestabdant staklių. Be to šis metodas turėtų leisti atpažinti jau šiek tiek savaiminiu nudilimu nudilusį įrankį. Tuomet būtų galima suplanuoti ir pasiruošti jo keitimui artimiausiu metu, taip sumažint tam reikalingas laiko sąnaudas ir išvengiant broko gamybos. Kad būtų galima tai atlikti visų pirma reikia išsiaiškinti, kokie yra pagrindiniai tekinimo plokštelių nudilimo tipai.

### 5.1 Tekinimo plokštelių nudilimo tipai

Šioje darbo dalyje, bus trumpai aptariama kokie yra tekinimo plokštelių nudilimo tipai. Taip pat trumpai aptariama visų nudilimo tipų pagrindinės priežastys [28].

Įprastas šoninis nudilimas (žr. 21 pav.) yra nuspėjamas ir nuoseklus, todėl tai yra labiausiai norimas nudilimo tipas. Jis kyla dėl abrazyvinio dilimo, kai kietosios apdirbamos medžiagos dalelės braižo plokštelės pjaunančiąją briauną, taip po truputį ją bukindami. Šis dilimas kyla apdirbant visas medžiagas, kadangi tai yra natūralus plokštelės dilimas ir ji galiausiai nudils, jei kokia nors kita priežastis nesugadins jos anksčiau.



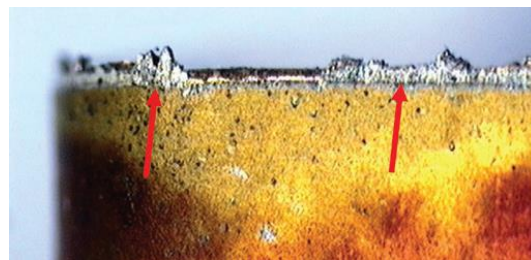
21 pav. Plokštelė su šoniniu nudilimu [28]



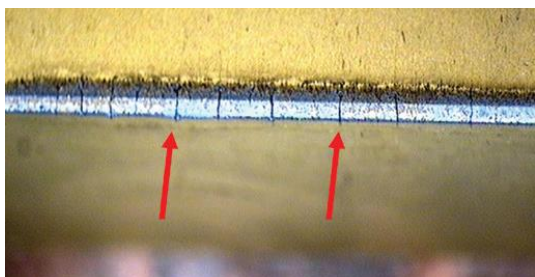
22 pav. Plokštelė su krateriniu nudilimu [28]

Kraterinis nudilimas (žr. 22 pav.) kai plokštelę veikia difuzinio, adhezinio ir abrazyvinio dilimo kombinacija. Karštis nuo apdirbamos medžiagos drožlių sukelia apdirbamos medžiagos dalelių ir plokštelės cheminių elementų tarpusavio sąveiką. Kylant šiai sąveikai, atskiri elementai pereina iš vieno paviršiaus į kitą, sudarydami cheminius junginius, kurie būna mechaniškai neatsparūs ir dyla, todėl plokštelės paviršiuje susidaro krateris. Kai šis krateris tampa pakankamai didelis plokštelės pjaunančioji briauna nulūžta arba deformuojasi.

Keteros (žr. 23 pav.) susidarymas kyla dėl apdirbamos medžiagos dalelių susivirinimo su apdirbimo plokštelės pjaunančiąja briauna. Ši ketera galiausiai nulūžta, dažnai kartu pasiimdama ir dalelę įrankio pjaunančiosios briaunos, o tai didina trintį ir skatina dar intensyvesnį susivirinimą. Kyla padirbant plastiškas medžiagas mažais apdirbimo greičiais.



**23 pav.** Plokštelė su susidariusia ketera [28]



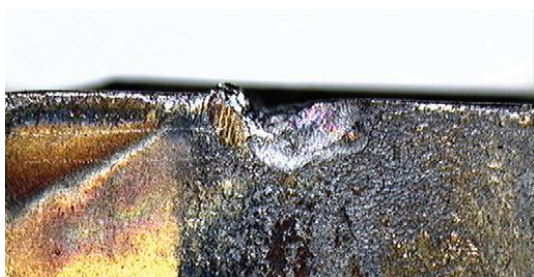
**24 pav.** Plokštelė su terminiu krekingu [28]

Terminis krekingas (žr. 24 pav.) kyla dėl staigaus temperatūrų pokyčio, atskirų plokštelės zonų temperatūrų skirtumo ir ciklinių mechaninių apkrovų derinio. Dėl įtrūkimų esančių stačiai pjovimo briaunai, ši galiausiai nutrūpa. Kyla kai apdirbama didelis skaičius detalių arba pjovimo zona yra nepakankamai aušinama.

Plastinė plokštelės pjaunančiosios briaunos deformacija (žr. 25 pav.) gali kilti dėl per didelės temperatūros pjovimo zonoje, kuri suminkština pjovimo plokštelės medžiagą. Taip pat tai gali kilti dėl per didelių pjovimo jėgų, kuomet per didelis pjovimo plokštelės slėgis į ruošinį sąlygoja pjovimo briaunos deformaciją.



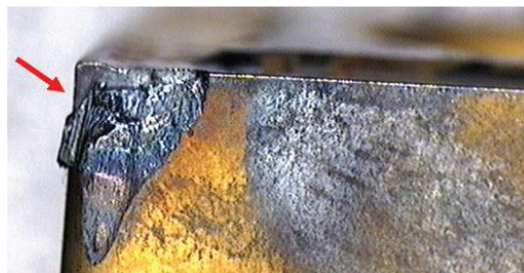
**25 pav.** Plokštelė su plastine pjaunančiosios briaunos deformacija [28]



**26 pav.** Plokštelė su išdrožiniu nudilimu [28]

Išdrožinis nudilimas (žr. 26 pav.) kyla kai ruošinio paviršius yra daug kietesnis arba turintis daugiau abrazyvinių intarpų nei medžiaga esanti giliau. Tai gali kilti dėl paviršiaus sukietėjimo po ankstesnio pjovimo, terminio apdirbimo ar paviršiaus įspaudimo. Taip pat tai gali sukelti įtempių koncentraciją ties pjovimo briauna.

Įtrūkimas pjaunančioje briaunoje (žr. 27 pav.) atsiranda kai pjovimo plokštelė neatlaiko mechaninės apkrovos ir nulūžta jos pjovimo briauna. Praktikoje šis nudilimo tipas dažniausiai kyla dėl neteisingai parinktų apdirbimo režimų arba dėl labai greitai kintančių jėgų apdirbant netolygius ruošinius



27 pav. Plokštelė su įtrūkimu[28]

## 5.2 Bandyje naudota įranga

Vienas iš galimų įrankio nudilimo matavimo metodų yra vibracijų kylančių suklysi-ruošiny-pjovimo įrankis aplinkoje matavimas. Palyginus surinktus duomenis galima surasti jų priklausomybę nuo įrankio būklės bei kitimo tendencijas, kurios vėliau padėtų nustatyti apdirbimo įrankio nudilimą. Norint surasti pjovimo įrankio vibracijų, apdirbant ruošinį, priklausomybę nuo jo nudilimo ir buvo atliktas šis bandymas.

Bandymas buvo atliekamas CNC apdirbimo centro Tornos Deco 13a aplinkoje. Vibracijos buvo matuojamos įrankio laikiklyje dvejomis kryptimis: 1 jutiklis matavo vibracijas skersai ruošiniui ( pagal 10 pav. pavaizduota staklių ašių kinematinę schemą galima pastebėti, kad ši kryptis atitinka staklių X1 ašies kryptį), 2 jutiklis išilgai ruošiniui (Tai atitinka staklių Z1 ašies kryptį) (žr. 28 pav.).

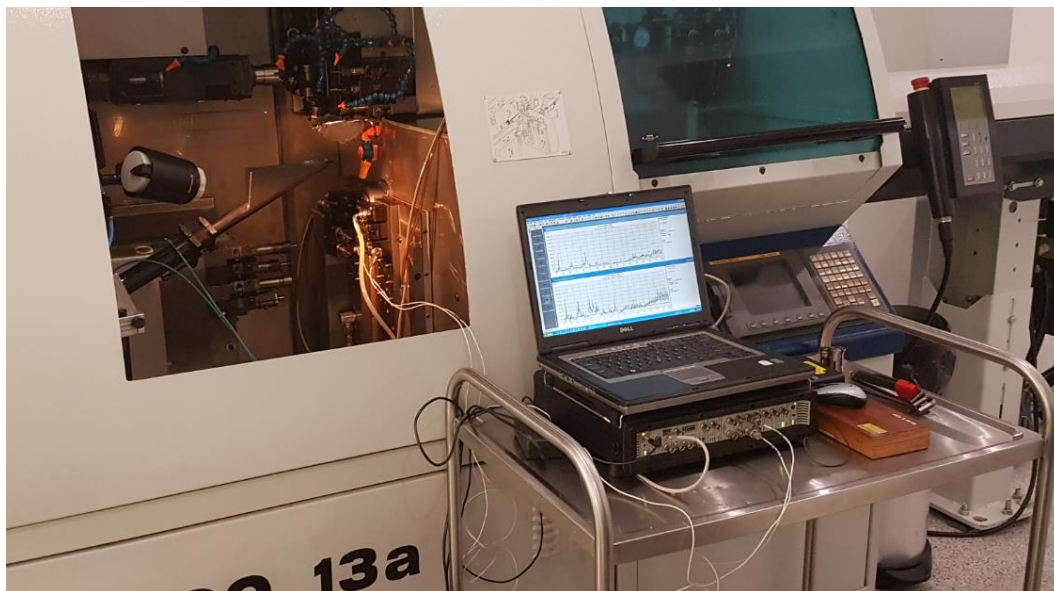


28 pav. Pjezoelektrinių jutiklių pozicijos bandymo metu

Matavimui buvo naudota danų firmos Bruel&Kjaer vibracijų ir triukšmo matavimo aparatūra, kurią sudarė modulinis precizinis vibracijų ir triukšmo matuoklis Pulse 3560C (žr. 29 pav.) ir vibracijų kalibravimo įrenginys, tipas 4294 Nr. 2331170. Duomenų apdorojimui ir analizei buvo naudota bazinė FFT ir CPB vibracijų ir triukšmo analizės programa Nr.7700. Ši aparatūra



atitinka pirmos klasės reikalavimus (standartas IEC 61672). Vibracijoms matuoti buvo panaudotas pjezoelektrinis jutiklis Endevco 751-100. Šis jutiklis gali matuoti dažnius nuo 1 iki 10000Hz, o jo jautrumas yra 100 mV/g (žr. 30 pav.).



**29 pav.** modulinis precizinis vibracijų ir triukšmo matuoklis Pulse 3560C bandymo metu

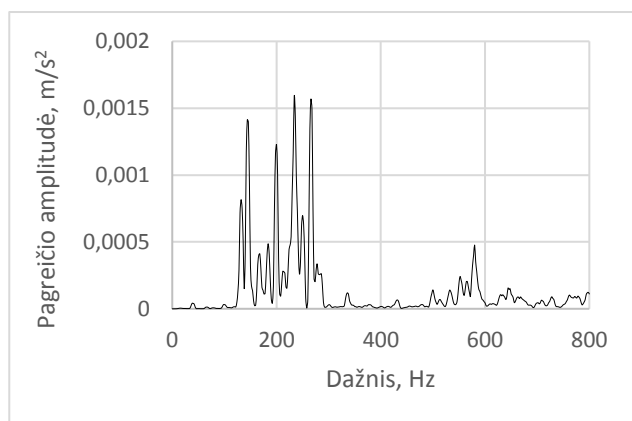


**30 pav.** Pjezoelektrinis jutiklis Endevco 751-100 [29]

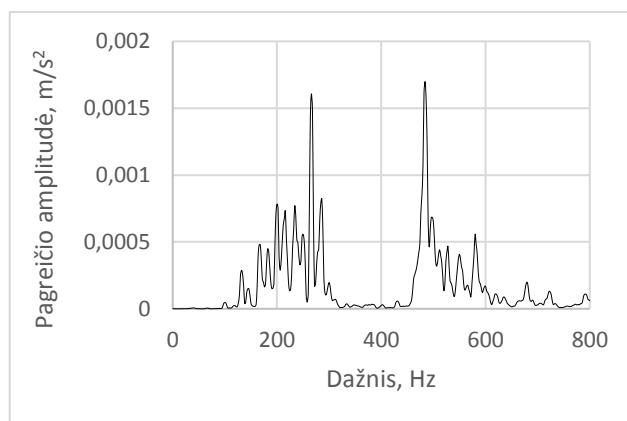
### **5.3 Bandymo duomenys ir rezultatai**

Bandymas buvo atliekamas keliais etapais: staklių sūklis sukasi laisva eiga, ruošinys apdirbamas su nauja tekimo plokšte, trejos plokštelės su įprastu šoniniu nudilimu, plokštelė su plastine deformacija ir plokštelė su įtrūkimu. Buvo parinkti tik trys nudilimo tipai, nes jie yra dažniausiai pasitaikantis įmonėje, kurioje buvo atliekami bandymai. O su šoniniu nudilimu parinktos kelios plokštelės, nes tai yra dažniausias plokštelių nudilimo tipas ir galimybė jį atpažinti praktikoje turėtų didžiausią naudą.

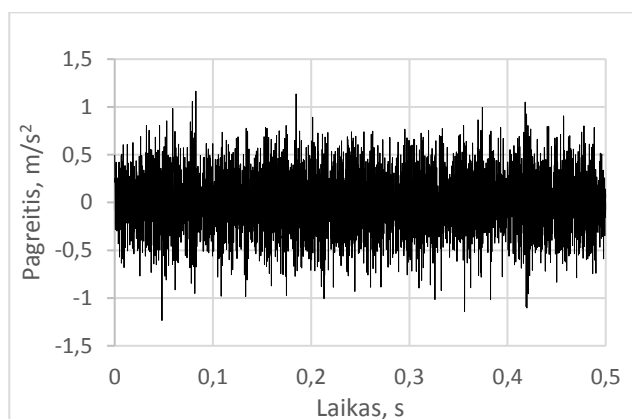
Pirmoje bandymo dalyje apdirbimo staklių sūklis buvo nustatytas sukis laisva eiga 2390 aps/min greičiu ir pamatuotos vibracijos kylančio įrankio laikiklyje tuo metu. Bandymo metu gautos vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos X1 ir Z1 kryptimi yra pateikiamos atitinkamai 31 ir 32 pav., o oscilogramos atitinkamai 33 ir 34 pav.



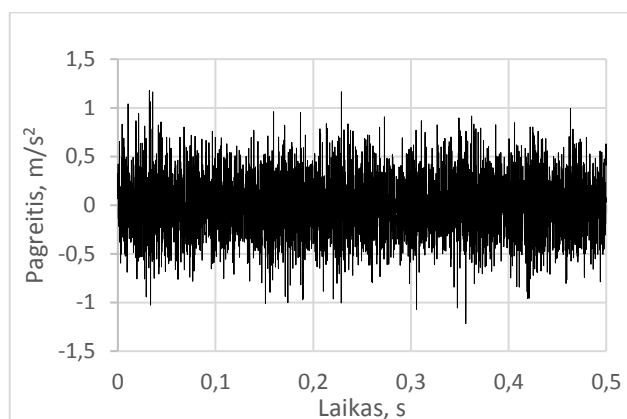
**31 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



**32 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



**33 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi



**34 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

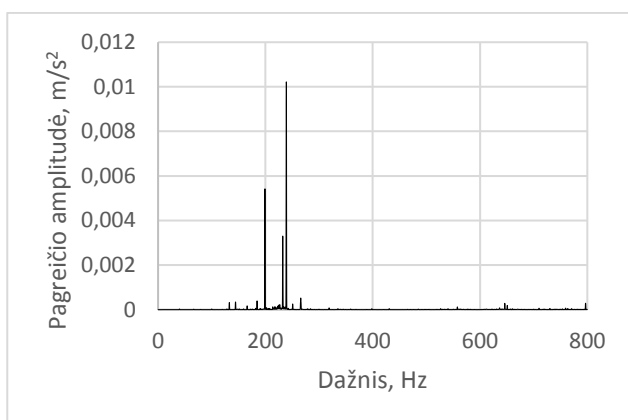
Skersinio vibracinio pagreičio dažninėje charakteristikoje galima pastebėti šiek tiek padidėjusią amplitudę ties 38,6 Hz dažnio zona ( $0,041 \text{ mm/s}^2$ ), šį padidėjimą galima paaiškinti dėl sūkliaus sukimosi dažnio, kuris jam besisukant 2390 aps/min yra lygus 39,8 Hz. Pagreičio amplitudės padidėjimą galima pastebėti ir išilginėje dedamojoje atitinkamai  $0,00586 \text{ mm/s}^2$  ties 39,8 Hz. Vidutinė vibracinio pagreičio dedamoji X1 ašies kryptimi  $0,138 \text{ mm/s}^2$ , o Z1 ašies kryptimi  $0,173 \text{ mm/s}^2$ .

### 5.3.1 Nauja tekimo plokštelė

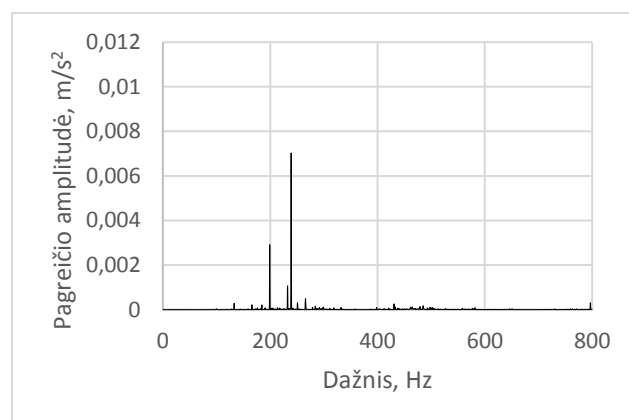
Ši bandymo stadija buvo atliekama panaudojant naują pjovimo plokštelę ( žr. 35 pav.) ir apdirbant 6 mm skersmens Ti-6Al-4V titano strypą. Apdirbimo režimai: *sūklis sukimosi greitis* ( $n$ ) = 2390 *aps/min* , *pastūma* ( $f$ ) = 0,01 *mm/aps*, *pvimo gylis* ( $t$ ) = 0,5 *mm*. Bandymo metu gautos vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos X1 ir Z1 kryptimis yra pateikiamos atitinkamai 36 ir 37 pav., o oscilogramos atitinkamai 38 ir 39 pav.



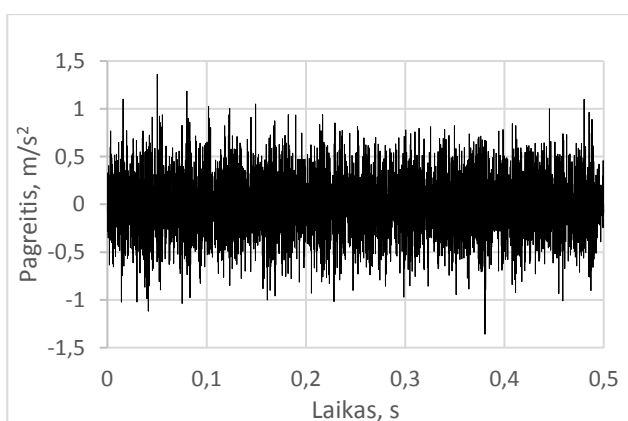
35 pav. Naujos tekimo plokštelės vaizdas



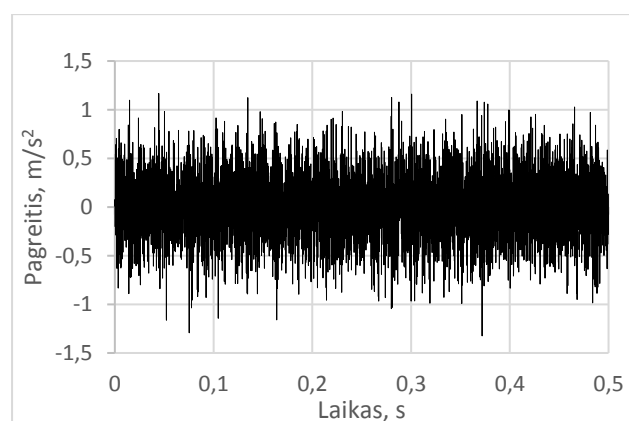
36 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



37 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



38 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi

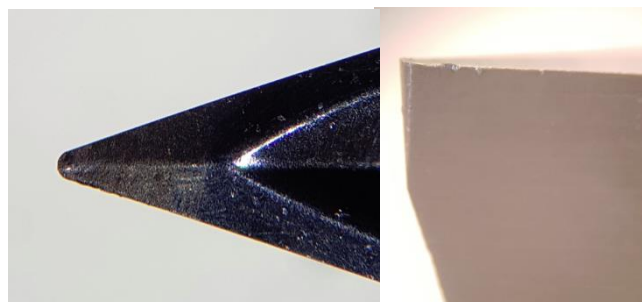


39 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

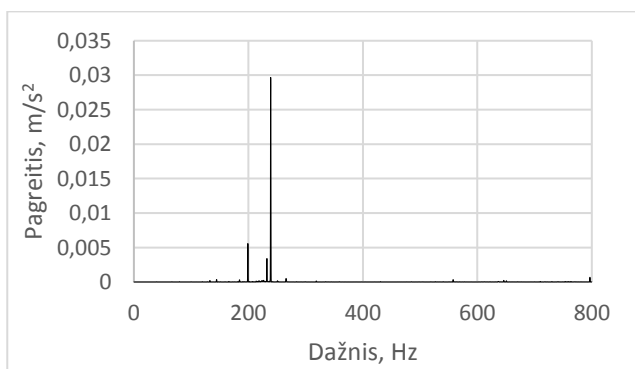
Iš 36 ir 37 pav. galima pastebėti, kad pradėjus apdirbimą vidutinė vibracinio pagreičio vertė sumažėjo atitinkamai iki  $0,0337 \text{ mm/s}^2$  ir  $0,0252 \text{ mm/s}^2$ , tačiau padidėjo amplitudė ties  $239 \text{ Hz}$  dažnio zona. Šį reiškinį galima paaiškinti dėl bazuojančio elemento t. y. kreipiančiosios įvorės formos (žr. 9 pav.). Įvorė turi 3 kumštelius, todėl strypui apsisukus 1 kartą, 6 kartus pasikeičia bazavimo sąlygos, o dažnis  $239 \text{ Hz}$  sukliui sukantis  $2390 \text{ aps/min}$  greičiu ir parodo šių bazavimo sąlygų kitimo dažnį. X1 ašies kryptimi vibracinio pagreičio dydis ties  $239 \text{ Hz}$  dažniu pasiekia didžiausią vertę iš tiriamo dažnių ruožo  $0 \dots 800 \text{ Hz}$  ( $10,22 \text{ mm/s}^2$ ), o ties  $39,8 \text{ Hz}$  dažniu galima pastebėti sumažėjusią amplitudę ( $0,021 \text{ mm/s}^2$ ) lyginant su esančia sukliui besisukant laisva eiga. Z1 ašies dedamojoje galima pastebėti panašią kitimo tendenciją, sumažėjusią amplitudę ( $0,0049 \text{ mm/s}^2$ ) ties  $39,8 \text{ Hz}$  ir didžiausią vertę ( $7,03 \text{ mm/s}^2$ ) ties  $239 \text{ Hz}$  dažniu. Kadangi pradėjus apdirbimą galima pastebėti, kad vibracinio pagreičio ties  $39,8 \text{ Hz}$  dažniu dydis tampa nykstamai mažas palyginus su dydžiu, kuris yra ties  $239 \text{ Hz}$  dažniu ( šioje dalyje jis yra vidutiniškai 960 kartų mažesnis), toliau šis dydis nebus nagrinėjamas.

### 5.3.2 Plokštelė su šoniniu nudilimu

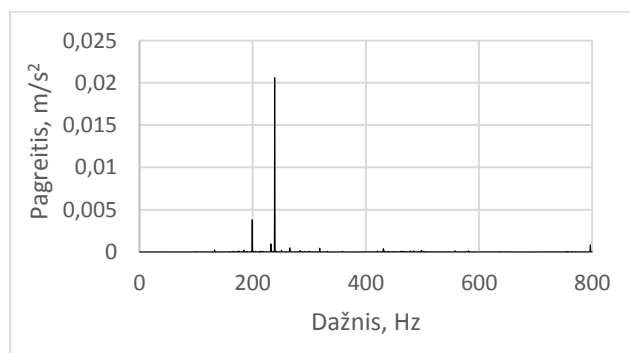
Šioje bandymo dalyje pjovimo plokštelė buvo keičiamos į vis labiau šoninio nudilimo tipu nudilusią plokštelę. 2 įrankis mažiausiai nudilęs, o 4 įrankis labiausiai. Bandymo metu buvo naudoti tokie pat apdirbimo režimai. Žemiau pateikiamos vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos ir oscilogramos X1 ir Z1 ašių kryptimis yra gautos apdirbimui naudojant labiausiai nudilusį įrankį (žr. 40 pav.). Charakteristikas gautas su kitomis, šioje dalyje tirtomis plokštelėmis galima rasti šio darbo 6 priede.



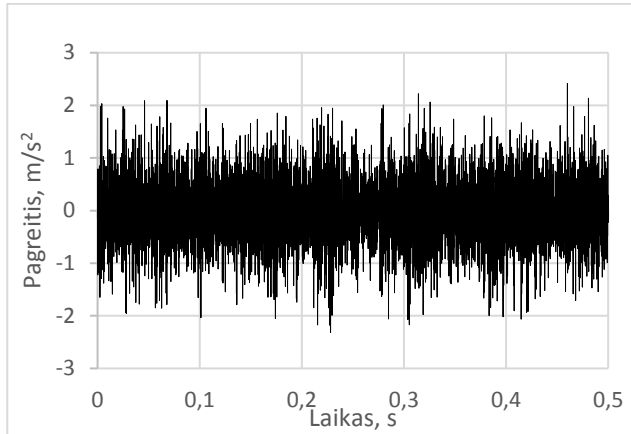
40 pav. Šoninio nudilimo tipu nudilusios tekinimo plokštelės vaizdas



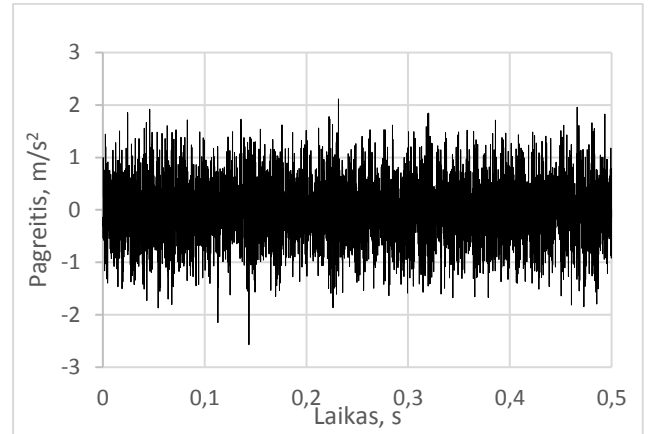
41 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



42 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



**43 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi



**44 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

Lyginant su nauja plokštele iš 41 ir 42 pav. galima pastebėti vibracinio pagreičio padidėjimą ties 239 Hz dažniu atitinkamai 29,68 mm/s<sup>2</sup> ir 20,61 mm/s<sup>2</sup>. Taip pat padidėjo ir vidutinė pagreičio vertė tiriamame 0...800 Hz ruože, X1 ašies kryptimi iki 0,0581 mm/s<sup>2</sup>, o Z1 ašies kryptimi 0,0422 mm/s<sup>2</sup>. Šį reiškinį galima paaiškinti padidėjusiomis pjovimo jėgomis, dėl nudilusios pjovimo plokštelės briaunos.

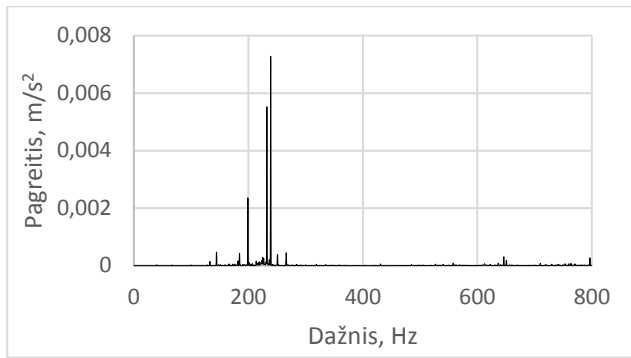
### 5.3.3 Plokštelė su plastine deformacija

Šioje bandymo dalyje pjovimo plokštelė buvo pakeista į plokštelę su plastine deformacija (žr 45 pav.). Apdirbimo režimai liko tokie pat. Bandymo metu gautos vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos X1 ir Z1 ašies kryptimis yra pateikiamos atitinkamai 46 ir 47 pav., o oscilogramos atitinkamai 48 ir 49 pav.

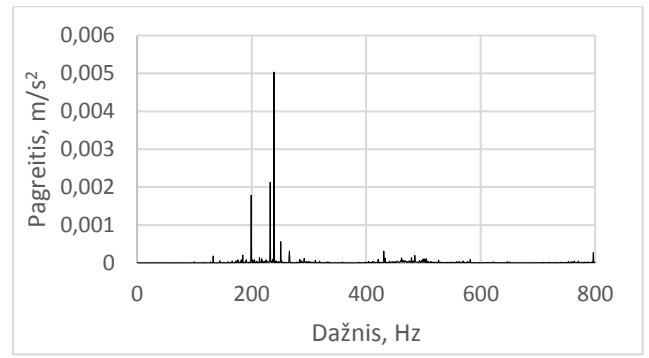


**45 pav.** Tekinimo plokštelė su plastine deformacija

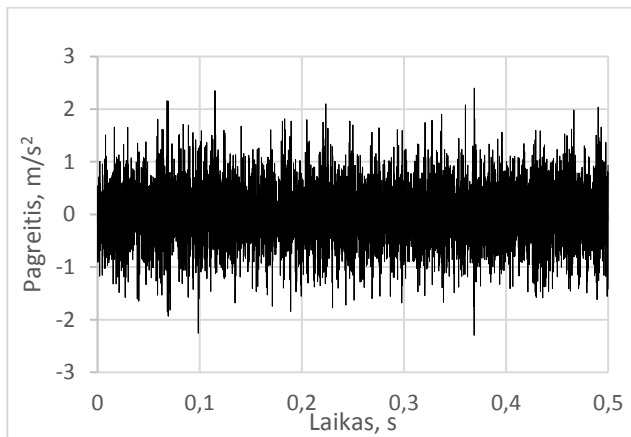




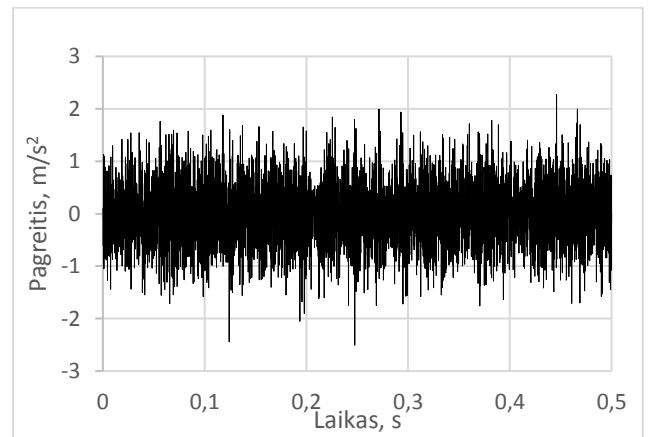
**46 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



**47 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



**48 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi

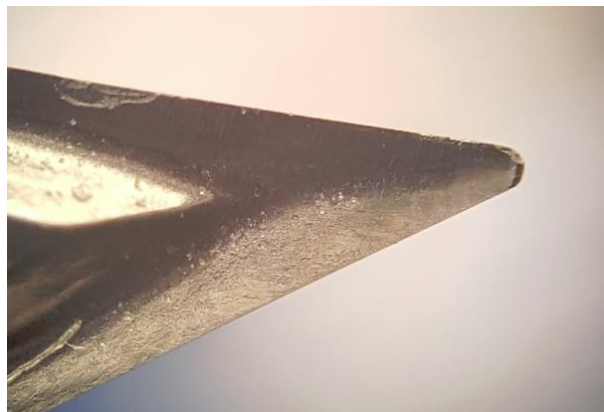


**49 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

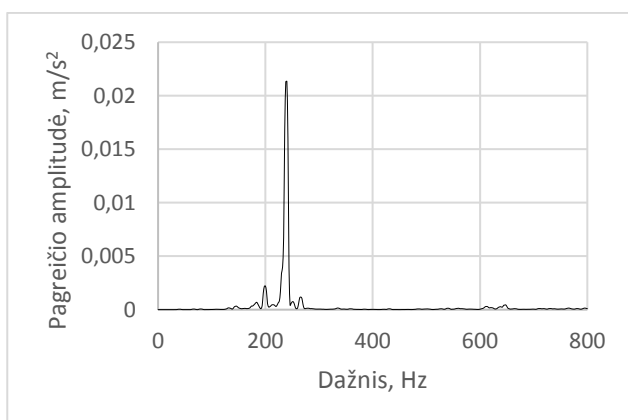
Iš 46 ir 47 pav. galima pastebėti vibracinio pagreičio dydžio ties 239 Hz dažniu sumažėjimą lyginant su nudilusiu įrankiu atitinkamai 7,28 mm/s<sup>2</sup> ir 5,04 mm/s<sup>2</sup>, taip pat sumažėjo ir vidutinė pagreičio vertė tiriamame ruože, X1 ašies kryptimi iki 0,0301 mm/s<sup>2</sup>, o Z1 ašies kryptimi 0,0226 mm/s<sup>2</sup>. Šie dydžiai sumažėjo tiek daug, kad tapo mažesni negu dydžiai, gauti su nauju įrankiu. Tai galima paaiškinti tuo, jog šios plokštelės pjaunančioji briauna nėra labai nudilusi, tiesiog yra deformavusi nedidelė dalis jos. Dėl tos deformavusios dalies pakyla pjovimo zonos temperatūra, o tai sumažina pjovimo jėgas ir jos tampa mažesnės nei naudojant naują įrankį. Deja, su šia plokštele gaunamas prastas detalės paviršius, nes deformavusi dalis yra ties peilio viršūnės suapvalinimo spinduliu.

### 5.3.4 Plokštelė su įtrūkusia pjaunančiąja briauna

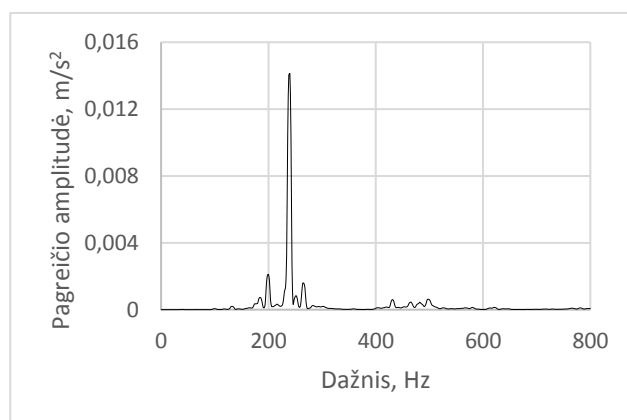
Paskutinėje bandymo dalyje pjovimo plokštelė buvo pakeista į plokštelę su įtrūkusia pjaunančiąja briauna (žr. 50 pav.). Apdirbimo režimai liko tokie pat. Bandymo metu gautos vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos X1 ir Z1 ašies kryptimis yra pateikiamos atitinkamai 51 ir 52 pav., o oscilogramos atitinkamai 53 ir 54 pav.



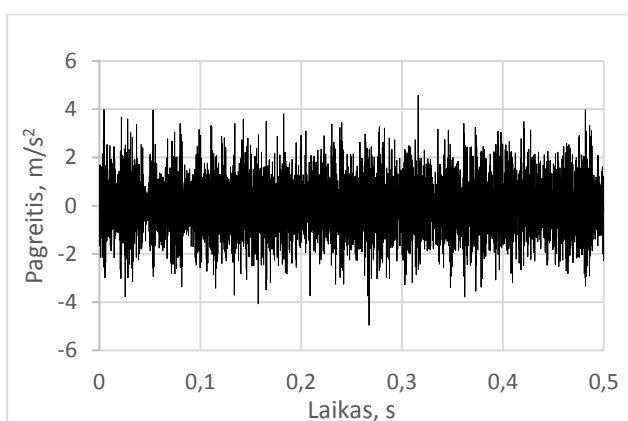
50 pav. Tekinimo plokštelės su įtrūkusia pjaunančiąja briauna



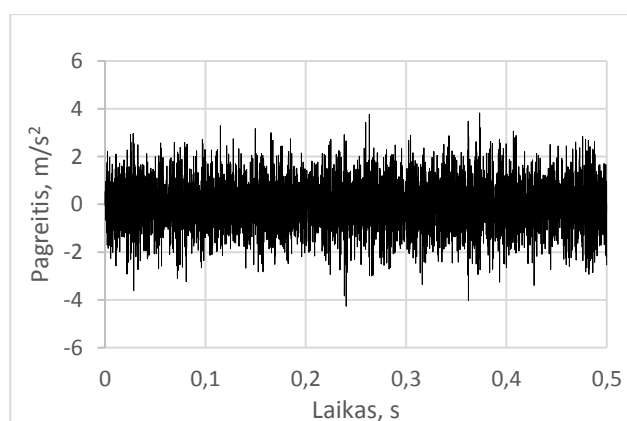
51 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



52 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



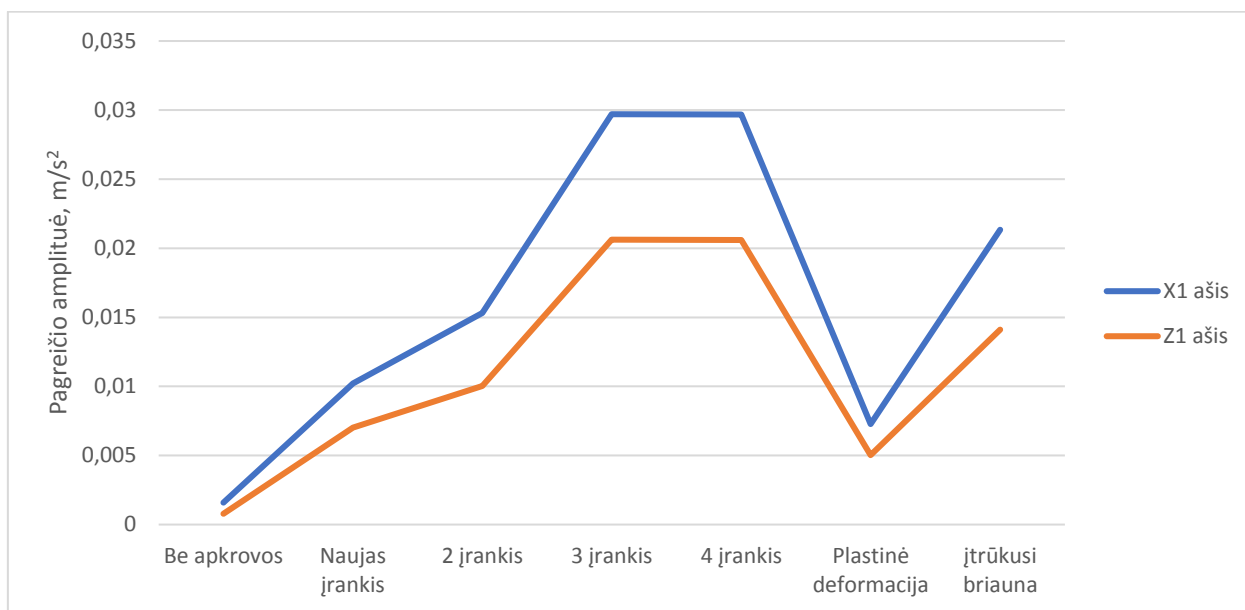
53 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi



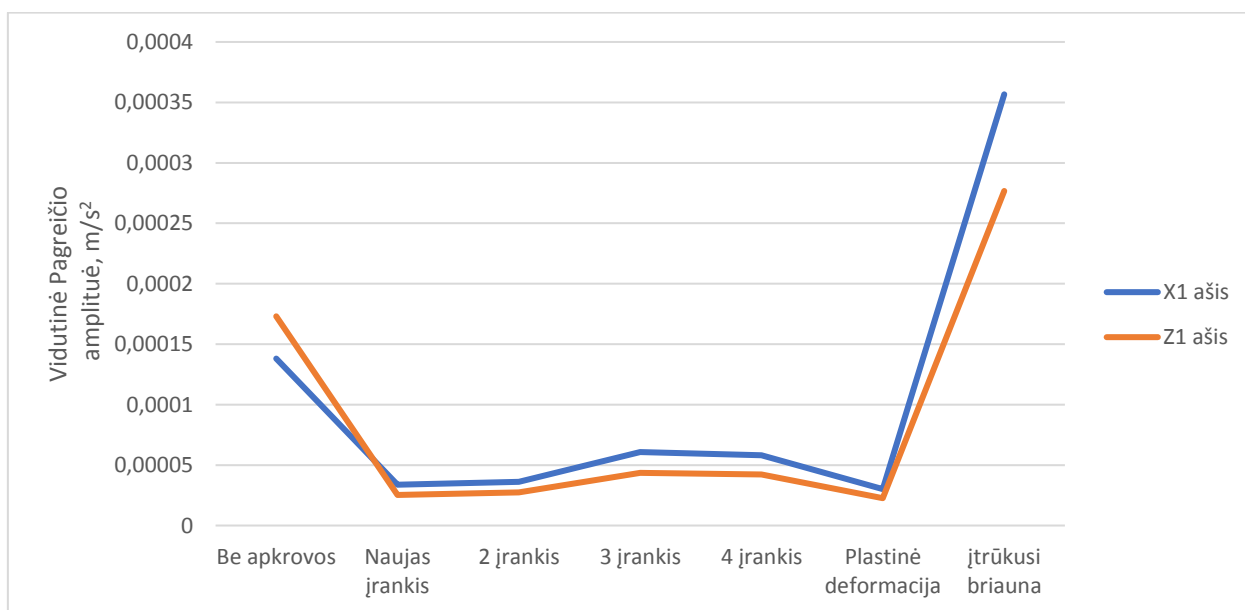
54 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

Iš 51 ir 52 pav. galima pastebėti, kad panaudojant plokštelę su įtrūkusia pjaunančiąja briauna vibracinio pagreičio dydis ties 239 Hz dažniu atitinkamai yra 21,34 mm/s<sup>2</sup> ir 14,12 mm/s<sup>2</sup>. Iš grafikų taip pat galima pastebėti bendrą vibracinio pagreičio padidėjimą visame tiriamame ruože, nes vidutinė jo vertė padidėjo iki 0,357 mm/s<sup>2</sup> ir 0,277 mm/s<sup>2</sup> atitinkamai X1 ir Z1 ašies kryptimis. Tai galima paaiškinti dideliu pjovimo jėgų padidėjimu, dėl labai nusidėvėjusio įrankio.

Apibendrinti vibracinio pagreičio amplitudės vertės ties 239 Hz dažniu priklausomybės nuo įrankio nudilimo dydžio ir tipo rezultatai yra pateikiami 55 pav.. Apibendrintas vidutinės pagreičio amplitudės vertės grafikas pateikiamas 56 pav..



**55 pav.** Pagreičio amplitudės ties 239 Hz dažniu priklausomybės nuo įrankio nudilimo grafikas



**56 pav.** Vidutinės pagreičio amplitudės dažnių srityje 0...800 Hz priklausomybės nuo įrankio nudilimo grafikas

Iš 55 pav. pateikiamo grafiko galima spręsti, kad kuo labiau nudilus plokštelė tuo didesnė yra vibracinio pagreičio vertė ties tiriamu dažniu. Tačiau, viskas pasikeičia įdėjus įrankį su deformavusiu briaunos kampu, tiek vidutinė pagreičio vertė, tiek reikšmė ties 239 Hz tampa mažesnė nei naujo įrankio. To priežastis gali būti padidėjusi pjovimo zonos temperatūra ir sumažėjusios pjovimo jėgos dėl įrankio nudilimo.

Esant įrankiui su įtrūkusia briauna galima pastebėti mažesnę nei naujo įrankio vibracinio pagreičio vertę ties 239 Hz dažniu ir labai padidėjusią vidutinę vibracinio pagreičio vertę.

Šį skyrių galima apibendrinti šiomis rekomendacijomis: .

1. Apdirbant su Tornos Deco 13a ir bazavimui naudojant „Schlenker“ F605 tipo kreipiančiąją įvorę dažnis į kurį reikia atkreipti dėmesį yra 6 kartus didesnis nei dažnis kurio sukasi staklių sūklis.
2. Staigus vibracinio pagreičio dydžio ir vidutinės vertės sumažėjimas gali reikšti pjaunančio įrankio briaunos deformaciją.
3. Įrankis su įtrūkusia briauna neturi didžiausios vibracinio pagreičio vertės ties 239 Hz dažniu, bet vidutinė vertė ruože 0...800 Hz yra pati didžiausia iš tirtų įrankių.

## IŠVADOS

1. Tyrimo metu buvo nustatinėjama tokių apdirbimo parametrų kaip: pjovimo greitis, pastūma, pjovimo gylis ir peilio viršūnės atstumas iki kreipiančiosios įvorės įtaka cilindriškumo paklaidai. Bandymai buvo atliekami pasitelkus Taguchi metodą. Atlikus ANOVA analizę buvo pastebėta, kad labiausiai cilindriškumo paklaidą nustato pjovimo gylis (59,34 %), o režimai, kuriems esant gaunama mažiausia paklaida yra *pjovimo greitis* ( $Vc$ ) = 45 m/min, *pastūma* ( $f$ ) = 0,02 mm/aps, *pjovimo gylis* ( $t$ ) = 0,1 mm, *peilio viršūnės atstumas nuo kreipiančiosios įvorės* ( $L$ ) = 12 mm.

2. Ištyrus, tų pačių apdirbimo parametrų kaip ir cilindriškumo paklaidai, įtaka paviršiaus šiurkštumui buvo nustatyta, kad mažiausias paviršiaus šiurkštumas yra gaunamas su šiais apdirbimo režimais:  $Vc = 60$  m/min,  $f = 0,01$  mm/min,  $t = 0,1$ ,  $L = 8$  mm. O ANOVA analizė parodė, kad labiausia paviršiaus šiurkštumo dydį nustato pastūma (75,92 %).

3. Ištyrus bandinio skersmens dydžio priklausomybę nuo aušinimo skysčio temperatūros, buvo nustatyta, kad didėjant aušinimo skysčio temperatūrai didėja ir bandinių skersmuo po apdirbimo. Darbo metu buvo pasiūlytas matmens dydžio pokyčio prognozavimo modelis, išreikštas tiesine funkcija  $\Delta x = a\Delta T = 0,001722 * 10^{-6}\Delta T$ ; Naudojant šią funkciją didžiausias skirtumas tarp prognozuojamos ir realios vertės yra  $3,8 * 10^{-6}$  mm.

4. Naudojant mašinų vibracijų bandymų įrangą buvo pamatuotos nudilusių tekimo plokštelių vibracijos X1 ir Z1 ašių kryptimis. Bandymui buvo naudojamos plokštelės su trijų skirtingų tipų nudilimais: šoninis nudilimas, viršūnės plastinė deformacija, įtrūkimas.

5. Eksperimento rezultatai parodė, kad apdirbant ruošinius su CNC programinio apdirbimo centru Tornos Deco 13a ir bazavimui naudojant „Schlenker“ F605 UP tipo kreipiančiąją įvorę dažnis į kurį reikia atkreipti dėmesį yra 6 kartus didesnis nei dažnis, kurio sukasi staklių sūklis. Eksperimento metu šis dažnis buvo 239 Hz.

6. Buvo nustatyta, kad pradėjus apdirbimą vidutinė vibracijų amplitudės vertė tiriamame 0...800 Hz ruože sumažėja lyginant su verte esant laisvai eigai. Tačiau pagreičio amplitudės vertė stipriai išauga ties tiriamuoju dažniu (239 Hz). Taip pat galima pastebėti, kad kuo labiau nudilęs įrankis, tuo vibracinio pagreičio amplitudė yra didesnė

7. Apdirbant su įrankiu, kurio briauna įtrūkusi, gaunama didžiausia vidutinė pagreičio amplitudės vertė,  $0,0357$  mm/s<sup>2</sup> ir  $0,0277$  mm/s<sup>2</sup> atitinkamai X1 ir Z1 ašies kryptimis. Tačiau vertė ties 239 Hz nėra pati didžiausia.

8. Tolesniuose darbuose yra numatoma geriau patikrinti tyrimo rezultatus ir juos pritaikyti plokštelėms su daugiau nudilimo tipų. Taip pat sukurti pigų ir efektyvų matavimo prietaiso prototipą.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Bražiūnas A., Mašinų gamybos technologijos pagrindai – Kaunas; Technologija, 2004, 512p.
2. Baskutis S., Skiedraitė I., Dubinskas E., Rimša G., Mechaninis apdirbimas programinio valdymo įrenginiais – Kaunas; UAB „Vitae Litera“, 2016, 243p.
3. Baskutis S., Kanapeckas K., Krančiukas R., Technologinio proceso tikslumo įvertinimas – Kaunas, Technologija, 2012, 27p.
4. Ostaševčius V., Markauskas S., Pjovimo teorija ir modernieji pjovimo būdai – Kaunas, Technologija, 2013, 106p.
5. Custompartnet.com. Paveikslėlio šaltinis. [Žiūrėta 2017-05-19]. Prieiga internete <http://www.custompartnet.com/wu/images/turning/turning-step.png>
6. arknovin.com. Paveikslėlio šaltinis. [Žiūrėta 2017-05-23]. Prieiga internete <http://www.arknovin.com/uploads/images/roughness-2.png>
7. Abdullah, A.B., Chia, L.Y., Samad, Z. The effect of feed rate and cutting speed to surface roughness, Asian Journal of Scientific Research 1 (1): 12-21, 2008.
8. Fang, X.D., Safi-Jahanshahi, H. A new algorithm for developing a reference-based model for predicting surface roughness in finish machining of steels, INT. J. PROD. RES., VOL. 35, NO. 1, 179-199, 1997.
9. O'zel, T., Karpat, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 467–479, 2005.
10. Benardos, P. G., Vosniakos G. C. Predicting surface roughness in machining: a review, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 833–844, 2003
11. Nithyanandam, J., Das, S.L., Palanikumar, K. Influence of cutting parameters in machining of titanium alloy; Indian Journal of Science and Technology, Vol 8(S8), 556–562, April 2015
12. Revankar, G.D., Shetty, R., Rao, S.S., Gaitonde, V.N. Analysis of Surface Roughness and Hardness in Titanium Alloy Machining with Polycrystalline Diamond Tool under Different Lubricating Modes, Materials Research.17 (4), 1010-1022, 2014.
13. Gupta, M.K., Sood, P.K. & Vishal S., Sharma, V.S. Machining Parameters Optimization of Titanium Alloy using Response Surface Methodology and Particle Swarm Optimization under Minimum-Quantity Lubrication Environment, Materials and Manufacturing Processes, 31, 1671-1682, 2016.

14. Sawangsri, W., Cheng, K. An experiment-based investigation on the partitioned distribution of cutting heat and cutting temperature in micro cutting, School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge UB8 3PH, UK, 2014.
15. Machado, A. R., Wallbank, J. Machining of titanium and its alloys – a review, Proc Instn Mech Engrs Vol 204 53-60, 1990
16. Suhail, A. H., Ismail, N., Wong, S. V., Abdul Jalil, N. A., Optimization of Cutting Parameters Based On Surface Roughness and Assistance of Workpiece Surface Temperature in Turning Process, American J. of Engineering and Applied Sciences 3 (1): 102-108, 2010
17. Siddpura, M., Paurobally, R., A review of chatter vibration research in turning, International Journal of Machine Tools & Manufacture 61 27-47, 2012
18. researchgate.com. Paveikslėlio šaltinis. [Žiūrėta 2017-06-02]. Prieiga internete [https://www.researchgate.net/profile/Nicolas\\_Salvat/publication/52008454/figure/fig1/AS:305737965293569@1449905019526/Figure-23-Chatter-marks-in-turning.png](https://www.researchgate.net/profile/Nicolas_Salvat/publication/52008454/figure/fig1/AS:305737965293569@1449905019526/Figure-23-Chatter-marks-in-turning.png)
19. Kassab, S. Y., Khoshnaw, Y. K., The Effect of Cutting Tool Vibration on Surface Roughness of Workpiece in Dry Turning Operation, Eng. & Technology, Vol.25, No.7 879-889, 2007
20. Risbood, A. K., Dixit, U. S., Sahasrabudhe, A.D., Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process, Journal of Materials Processing Technology 132 203–214, 2003
21. Upadhyay, V., Jain, P. K., Mehta, N. K., In-process prediction of surface roughness in turning of Ti–6Al–4V alloy using cutting parameters and vibration signals, Measurement 46 154–160, 2013
22. Abouelatta, O. B., Madl, J., Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations, Journal of materials processing technology 118 269-277, 2001
23. Lydinio Ti 6Al-4V savybės. Iš *Zapp*. [Interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017-10-31]. Prieiga per internetą: <https://www.zapp.com/fileadmin/download/03-orange/01-nickel-kobalt-titan/01-datenblaetter/16-Titanium%20Grade%205 TiAl6V4 e 09.13.pdf>
24. Applitec pjovimo įrankių katalogas. Iš *Applitec*. [Interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017-11-01]. Prieiga per internetą: <http://www.applitec-tools.com/images/stories/downloads/applitec%202015-2017%20web%20boutons.pdf>
25. Kreipiančioji įvorė. Iš *schlenker-spannwerkzeuge*. [Interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017-11-09]. Prieiga per internetą: [http://www.schlenker-spannwerkzeuge.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Catalog\\_english\\_klein.pdf](http://www.schlenker-spannwerkzeuge.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Catalog_english_klein.pdf)



26. Tornos DECO 13a CNC apdirbimo centro techniniai duomenys. Iš *Interempresas*. [Interaktyvus]. 2009. [Žiūrėta 2017-11-01]. Prieiga per internetą: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/948/tornos-deco-7-10a-uk.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/948/tornos-deco-7-10a-uk.pdf)
27. INNOVATEST TR220 paviršiaus kokybės matavimo prietaiso techniniai duomenys. Iš *Salutron*. [Interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017-11-02]. Prieiga per internetą: [https://www.salutron.de/fileadmin/redakteure/dokumente/InnovaTest/Datenbl%C3%A4tter/Data-sheet\\_TR-220.pdf](https://www.salutron.de/fileadmin/redakteure/dokumente/InnovaTest/Datenbl%C3%A4tter/Data-sheet_TR-220.pdf)
28. Tekinimo plokštelių nudilimo tipo vaizdai. Iš *nelsonstorm*. [Interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017-11-02]. Prieiga per internetą: <http://www.nelsonstorm.com/home/jail/home/nelson/images/cms/Documents/TechSupInsertWeatherHandout.pdf>
29. Endevco 751-100 akselerometro vaizdas ir techniniai duomenys. Iš *aimil*. [Interaktyvus] 2009. [Žiūrėta 2017-11-16]. Prieiga per internetą: [http://www.aimil.com/RESOURCES/RESOURCEFILE/373\\_Vibration\\_Sensor.pdf](http://www.aimil.com/RESOURCES/RESOURCEFILE/373_Vibration_Sensor.pdf)

## **PRIEDAI**

# 1 priedas. Tornos Deco 13a techninės charakteristikos [25]

## DECO 13a TECHNICAL CHARACTERISTICS

### SLIDING HEADSTOCK (AXIS Z1) (+C1 AS OPTION)

Max. bar passage	Ø 13 (16) mm
Length of parts – revolving guide bush	180 mm
RPM of programmable spindle	100 - 10,000 rpm
Positioned stop and indexing, increment	0.1 degree
Max. spindle power	2.2 (3.7) kW

### GUIDE BUSH HOLDER (X1/Y1) (X2/Y2)

No. of tools in the guide bush (fixed or turning)	2 x 5
Tool section	12 x 12 mm (12.7 x 12.7)
No. of drillers/cross millers at guide bush	6 (2 x 3)
Programmable rpm	100 - 8,000 rpm
Max. turning spindle power	0.55 (1.1) kW

### END UNIT (X3/Y3)

Max. no. of fixed end tools	4
Max. number of turning end tools	3
Programmable rpm	100 - 8,000 rpm
Max. power of turning spindles	0.55 (1.1) kW

### COUNTER-SPINDLE (Z4/Y4) AND COUNTER-OPERATIONS (X4) (+C4 AS OPTION)

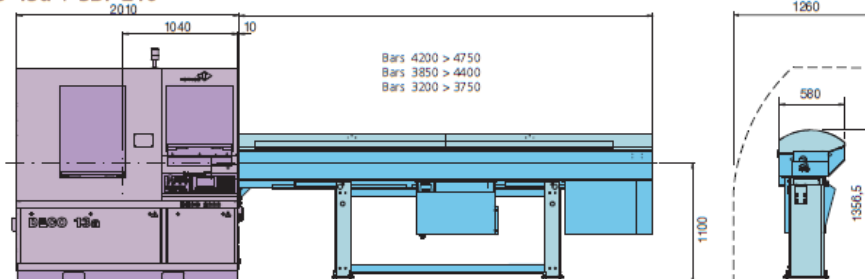
Max. diameter clamping capacity	13 (16) mm
Standard part length	180 mm
Programmable rpm	100 - 10,000 rpm
Positioned stop and indexing, increment	0.1 degree
Max. power of counter-spindle	1.5 (2.2) kW
Max. number of counter-operations	6
No. of fixed and turning spindles	6
Spindle rpm	100 - 8000 rpm
Max. power of turning spindles	1.5 (2.2) kW

### PNC-DECO PARALLEL NUMERICAL CONTROL

Number of simultaneous axes	all axes
Number of axes that can be interpolated	all axes

### COMPLIES WITH CE/CEM STANDARDS

### DECO 13a + SBF 216



#### GENERAL CHARACTERISTICS

Max. length	2000 mm
Max. width	1260 mm
Max. height (window open)	1950 (2250) mm
Height at spindle centre	1100 mm
Weight	~ 3000 kg
Cutting oil tank capacity	195 l
Control pump flow rate	14-58 l/min
Chippings tank capacity	78 l
Installed power	11 kVA
Pneumatic group pressure	6 bars
Ambient working temperature	5-35 degrees
Colours: grey RAL 7035, blue RAL 5013	
CE/CEM certified	

#### NUMERICAL CONTROL AND PROGRAMMING SOFTWARE

Type of control	PNC-DECO
Programming software	TB-DECO
Encoder Axes Motor	serial, absolute
Motor type (axes and spindles)	synchron, AC
Max number of axes	10 (12)
Designation of the axes	Z1 / X1 - Y1 / X2 - Y2 / X3 - Z3 - Z4 - Y4/X4 (C1 / C4 optional)
Designation of the spindles motors	S1 - S2 - S3 - S4 - S5 - S6
Min incrementation of program	1 $\mu$
Min resolution of axes	0.1 $\mu$
Number of tool correctors	31 per axis
Override for spindles and axes	0-120%
Computation of real production time	
Graphic simulation of program	
Programming language on TB-DECO	ISO
Function Transmit	

#### TB-DECO SOFTWARE PROGRAMMING LANGUAGE

Management of tool offsets
Chamfering functions
Cutter compensation
Management of origin offsets
Function "lag" and "differential"
Spindle synchronization
Synchronous feeds (mm/rev)
Thread chasing with constant, increasing, decreasing thread
Polygon milling in the guide-bush
Programming in Inch mode
Operations with C axis

## 2 priedas. Programos „ViciVision“ nustatymų ir gaunamų rezultatų jos aplinkoje vaizdas

The screenshot displays the ViciVision software interface. The top portion shows a circular profile scan of a part, with a blue line representing the surface profile. The scan is overlaid on a grid with angular markers at 90°, 180°, and 270°. A scale bar indicates a diameter of 10.500 [mm]. The bottom portion of the interface is a configuration panel for '05 - Ovališkumas' (Ovality).

**05 - Ovališkumas**

Calculate: **0.0047**

**Roundness**

**Ovališkumas**

Statistics  
 Print  
 Service  
 Disable

**Behavior**

References  
 Relative measure  
 Analysis

**Calculate method**

4: [Piece Rotational Scan (#1)]

**Filter**

LSC Least Square Mean Circle  
 1-500

**Notch type**

None

**Level notch parameters**

Level-Notch threshold (um) 10.0000  
 Notch direction +  
 Level-Notch margin (°) 5.0000

**Angle notch parameters**

Angle-Notch position Min  
 Angle-Notch amplitude (°) 10.0000

**Advanced**

Step (°) 0.0000  
 Repetition type All

**Validation**

Nominal value (mm) 0.0000  
 Tolerance 0.0100  
 Tolerance list Not used  
 Presalarm  
 Upper prealarm (%) 80  
 Cycle validation type Average  
 Cycle repeat calculation

OK Cancel

Windows taskbar: 01:18, 2017-10-23, ENG

### 3 priedas. Matavimo mašinos ViciVision MTL X5 techninė specifikacija

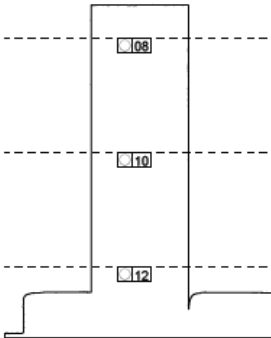
<i>MTL – Technical Data</i>	<i>MTL 250</i>	<i>MTL X5</i>	<i>MTL 300</i>	<i>MTL 500x60 EVO</i> <i>MTL 500/x120 EVO</i>
Largest measurable piece	270x40 mm	100x16 mm	270x40 mm	500x60 mm 500x120 mm
Largest loadable piece	300x90 mm	300x90 mm	300x90 mm	500x180 mm
Heaviest loadable piece	6 kg			15 kg
Accuracy of diameter measure (average diameter)	$(2+D[\text{mm}] / 100) \mu\text{m}^*$			$(2+D[\text{mm}] / 100) \mu\text{m}^*$ $(2,5+D[\text{mm}] / 100) \mu\text{m}^*$
Accuracy of length measure	$(5+L[\text{mm}] / 100) \mu\text{m}^*$			$(5+L[\text{mm}] / 100) \mu\text{m}^*$
Repeatability measure on diameter (average diameter)	0,4 $\mu\text{m}^*$			0,4 $\mu\text{m}^*$ 0,6 $\mu\text{m}^*$
Repeatability measure on length	3 $\mu\text{m}^*$			
Vertical scan velocity	100 mm/s	20 mm/s	100 mm/s	110 mm/s
Rotational scan velocity				105 mm/s
Rotational scan velocity	180 °/s			
Machine weight	90 kg		110 kg	160 kg
Dimensions HxLxW	880x560x650 mm		1000x530x650 mm	1235x640x775 mm
Suggested size of support surface	1200L x 800P x 700H mm			1200L x 800P x 500H mm
Max height	1000m (s.l.m.)			
Working temp [°C]	+15 ÷ +35			
Storage temp [°C]	-5 ÷ +45			
Max humidity at 40°C	50%			
Pressure	Environment			
Noise index	Min. di : 70db (A)			

## 4 priedas. Programos „ViciVision“ pateikiamos ataskaitos pavyzdys

14.00.053.01			
Responsible person for QC of Geometry: : _____	Date: 23/10/2017 00:44	LOT Number: Nr: 26 Measure unit: [mm , °]	Configuration: C:\Start\Archive\VICI VISION\DEVELOPMENT\~test\ model: T. Sukys Magistro bandymas 1
Drawing Nr.: T. Sukys Magistro bandymas 1		Responsible person for QC of Surface:	

GRAP.	Name	Nominal	Measure	Deviation	OVER TOL.
■	08 - Ovališkumas	0.0000	0.0030	0.0030	
■	10 - Ovališkumas 2	0.0000	0.0059	0.0059	
■	12 - Ovališkumas 3	0.0000	0.0035	0.0035	

The drawing shows a vertical stepped shaft. Three horizontal dashed lines indicate the locations of ovality measurements, labeled 08, 10, and 12 from top to bottom. The shaft has a wider top section, a narrower middle section, and a wider bottom section with a chamfered edge.

## 5 priedas. Paviršiaus šiurkštumo matavimo prietaiso INNOVATEST

### TR220 techninė charakteristika [26]

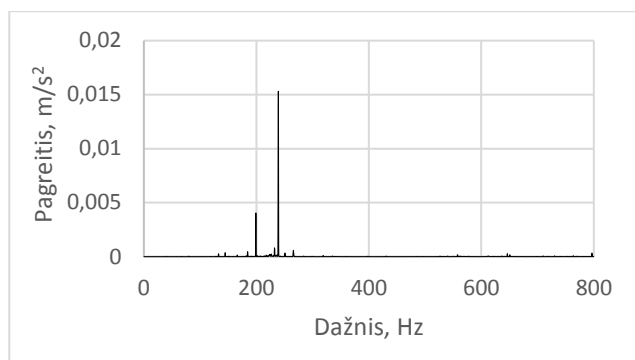
#### Technical specifications

Parameters	Ra, Rq, Rz, Rt, Rp, Rv, Ry, RS, RSm, RSk, Rz (JIS), R3z, Rmax, R <sub>Pc</sub> , Rk, Rpk, Rvk, Mr1, and Mr2
Assessed profiles	Finish profile (R)
Measuring system	Metric mm, imperial inch
Display resolution	0.001 $\mu$ m / 0.04 $\mu$ inch
Display	LCD 128 x 64 dot-matrix, with backlight
Dimensions of LCD	50mm x 30mm screen
Display languages	English
Display features	Pick-up stylus position indicator, Direct display of parameters, Direct printing, memory for 15 readings, Auto-off after 5 minutes with auto-store (last reading), Calibration through software
Data output	RS-232; direct to printer TA-230 or PC
Measuring range	Ra: 0.005 $\mu$ m - 16 $\mu$ m Rz: 0.02 $\mu$ m - 160 $\mu$ m
Pick-up measuring range	$\pm$ 20 $\mu$ m, $\pm$ 40 $\mu$ m, $\pm$ 80 $\mu$ m
Cutoff length	0.25mm / 0.8mm / 2.5mm/Auto
Evaluation length Ln	1~5 cut-off (selectable)
Tracing length Ln	(1~5 cut-off) + 2 cut-off (selectable)
Digital filter	RC, PC-RC, Gauss, D-P
Pick-up	Standard model TS100, inductive, Diamond tip radius 5 $\mu$ m
Bores from diameter	6.0mm, depth 15mm (TS-100)
Power	Li-ion battery rechargeable
Charger	220V, 20Hz
Working temperature	0°C - 40°C
Relative humidity	<80%
Operating temperature	-25°C - 60°C
Ventilation	Grade 3
Dimensions	141mm x 56mm x 48mm
Weight	440gr

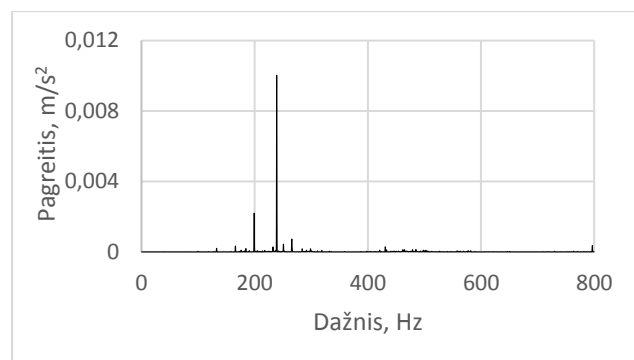


## 6 priedas. Vibracinio pagreičio dažninės charakteristikos ir oscilogramos

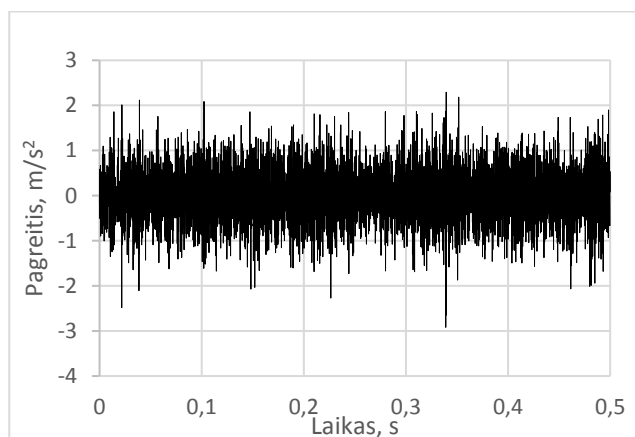
### 2 įrankis



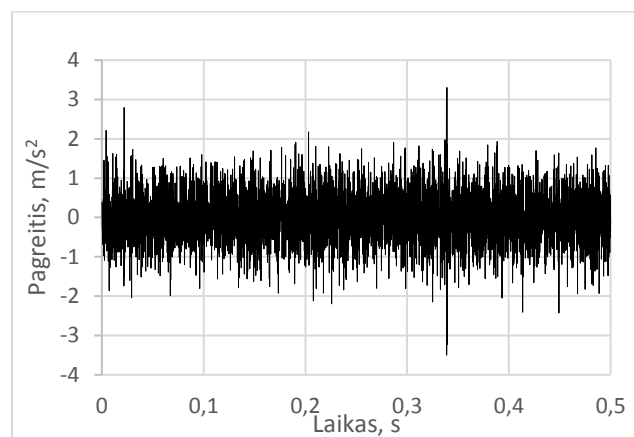
57 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



58 pav. Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi

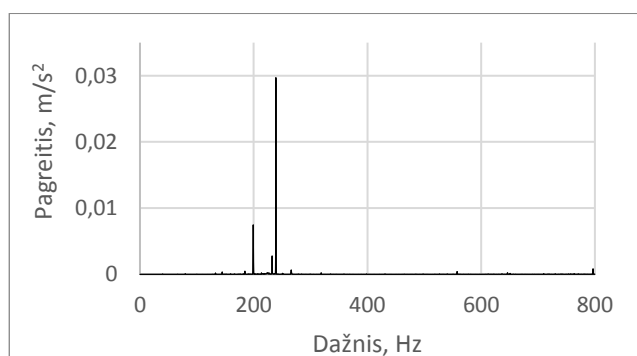


59 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi

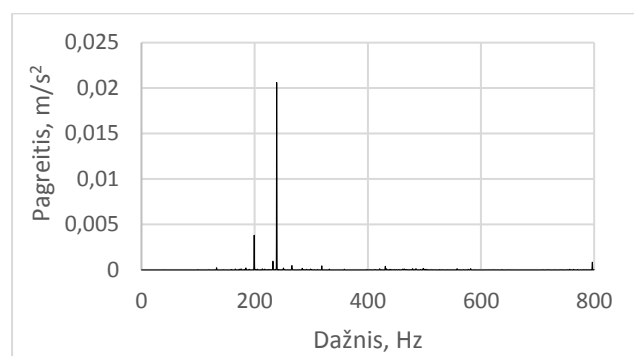


60 pav. Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi

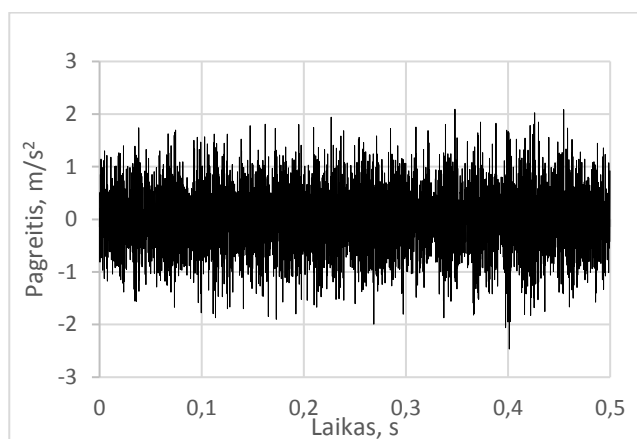
### 3 įrankis



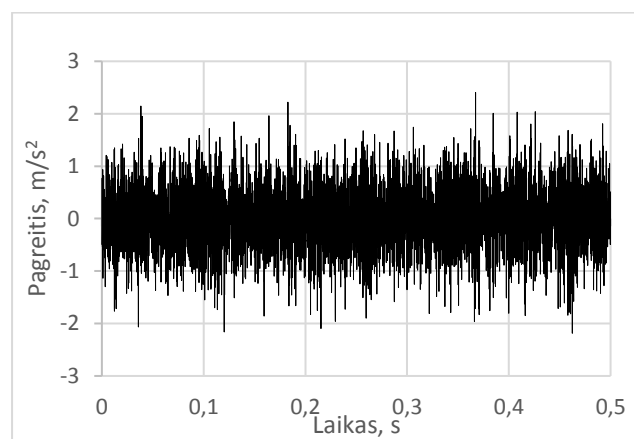
**61 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika X1 ašies kryptimi



**62 pav.** Vibracinio pagreičio amplitudės dažninė charakteristika Z1 ašies kryptimi



**63 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma X1 ašies kryptimi



**64 pav.** Vibracinio pagreičio oscilograma Z1 ašies kryptimi