



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

Algis Marcinkevičius

TITANO (II) MIKROFREZAVIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Virginija Gylienė

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

TITANO (II) MIKROFREZAVIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (621H70004)

Vadovas

(parašas) **Lekt. dr. Virginija Gylienė**
(data)

Recenzentas

(parašas) **Doc. dr. Brigita Abakevičienė**
(data)

Projektą atliko

(parašas) **Algis Marcinkevičius**
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Algis Marcinkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Titano (II) mikrofrezavimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. sausio 11 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Algio Marcinkevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Titano (II) mikrofrezavimo tyrimas“ 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)

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. TITANO (II) MIKROFREZAVIMO TYRIMAS

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

2. Projekto tikslas. Atlikti gryno titano (II) mikrofrezavimo tyrimą, įvertinant pjovimo režimų įtaką apdirbamam paviršiui.

3. Projekto struktūra. Literatūros apžvalga: titano ir jo lydinių, mikrofrezavimo, drožlių ir užvartų susiformavimo. Eksperimentų atlikimas: 1) įrankių, staklių, ruošinio paruošimas mikrofrezavimui; 2) staklių valdymo programų parengimas mikrofrezavimui; 3) eksperimentinio plano sudarymas; 4) mikrofrezavimu apdirbto paviršiaus kokybės įvertinimas, eksperimentų metu susidariusių užvartų ir gautų drožlių analizė; 5) statistinė analizė; 6) darbo išvados.

4. Reikalavimai ir sąlygos. Sudaryti eksperimentinį planą, išmokti valdyti mikrofrezavimo stakles ir kitus įrenginius bei programinę įrangą, reikalingą apdirbto paviršiaus kokybiniam įvertinimui, baigiamojo projekto tema parašyti publikaciją.

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

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Studentas Algis Marcinkevičius
(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas lekt. dr. Virginija Gylienė
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

Algis, Marcinkevičius. Titano (II) mikrofrezavimo tyrimas.
Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. Virginija Gylienė;
Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.
Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.
Reikšminiai žodžiai: mikrofrezavimas, užvarta, drožlė, paviršiaus šiurkštumas.
Kaunas, 2018. 54 p.

SANTRAUKA

Baigiamojo magistro darbo tikslas – atlikti gryno titano (II) mikrofrezavimo tyrimą, įvertinant pjovimo režimų įtaką apdirbamam paviršiui.

Literatūros apžvalgoje, apžvelgtos didžiausios ištinkančios problemos mikrofrezuojant titaną ir jo lydinius, savybės ir pritaikymo sritys, taip pat apžvelgtas drožlių ir užvartų susiformavimo proceso mechanizmas.

Eksperimentinėje dalyje aprašytas pasiruošimas eksperimentui. Sudarytas eksperimentinis planas remiantis Taguchi metodu, parinkti pjovimo režimai. Aprašyta eksperimento eiga, naudota įranga ir atlikti matavimai.

Rezultatų dalyje aptariami matavimų rezultatai ir atliekamas vizualinis paviršiaus kokybės įvertinimas.

Algis, Marcinkevičius. The Research of Micro-Milling of Titanium (Grade 2).
Master's Final Project / supervisor assoc. prof. Virginija Gylienė.
The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.
Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.
Key words: micromilling, burr, chip, surface roughness.
Kaunas, 2018. 54 p.

SUMMARY

The aim of the final master's thesis is to perform a research of micro-milling of pure titanium (II), assessing the influence of cutting conditions on the machined surface.

The review of the literature was done to review the major problems of the micro-milling of titanium and its alloys, properties and applications, as well an overview of the mechanism of the formation of chips and burrs.

The experimental part describes the preparation for the experiment. An experimental plan based on the Taguchi method has been developed, cutting condition were selected. Description of the experiment, used equipment and measurements.

The results section discusses the results of the measurements and carries out a visual assessment of the surface quality.

Padėka

Pirmiausia norėčiau padėkoti savo praktikos vadovei prof. Stefania Bruschi už savo paramą, pagalbą ir vertingus patarimus praktikos metu atliekant eksperimentą, nes be jos šis darbas nebūtų įmanomas. Taip pat Marco Sorgato ir visai metrologijos grupei už bendradarbiavimą tyrimo metu ir Erasmus+ programai už suteiktą galimybę įgauti neįkainojamos patirties.

Taip pat noriu padėkoti savo baigiamojo magistro darbo vadovei lekt. Virginijai Gylienei už savo paramą ir vertingus patarimus rašant baigiamąjį magistro darbą.

Magistro darbo eksperimentinė dalis atlikta Italijoje, Padovos universitete pagal Erasmus programą 2017. 06. 01 – 07. 31 laikotarpiu. Didžioji dauguma eksperimentų atlikti Rovigo, TE.SI. laboratorijoje, kurios sritis yra precizinė ir mikro gamyba.

TURINYS

Įvadas.....	1
1. Literatūros apžvalga	2
1.1. Titanas ir jo lydiniai	2
1.2. Mikrofrezavimas	4
1.2.1. Mikrofrezavimo taikymo sritys	5
1.3. Drožlių susiformavimas	5
1.3.1. Drožlių morfologija ir susiformavimo mechanizmas	6
1.4. Užvartų susiformavimas.....	7
2. Eksperimentinė dalis	12
2.1. Mikrofrezavimo staklės.....	12
2.2. Mikrofrezavimo staklių paruošimas eksperimentams atlikti	13
2.3. Medžiaga ir pasiruošimas.....	14
2.4. Įrankių parinkimas.....	16
2.5. Eksperimentinis projektavimas	17
2.6. Drožlių stebėjimas.....	19
2.7. Paviršiaus topografija.....	20
2.8. Užvartų stebėjimas	22
3. Rezultatai.....	25
3.1. Paviršiaus kokybės įvertinimas	25
3.2. Užvartų įvertinimas	26
3.3. Drožlių įvertinimas.....	29
3.4. Apdirbimo laikas	30
4. Statistinė analizė	32
Išvados ir pasiūlymai	39
Literatūros šaltinių sąrašas.....	41
Priedai.....	43
1 priedas. Eksperimentų matavimo rezultatai.....	43
2 priedas. Taguchi analizė: Vidutinio aritmetinio aukščio S_a	44
3 priedas. Taguchi analizė: Vidutinio kvadratinio aukščio S_q	45
4 priedas. Taguchi analizė: Paviršiaus šiurkštumo R_a	46
5 priedas. Taguchi analizė: Užvartų pločio pagal pastumą	48
6 priedas. Taguchi analizė: Užvartų pločio prieš pastumą	50
7 priedas. Taguchi analizė: Užvartų aukščio pagal pastumą	52
8 priedas. Taguchi analizė: Užvartų aukščio prieš pastumą	52
9 priedas. Magistro baigiamojo darbo tema parengtos publikacijos 1-as puslapis	53

Ivadas

Titanas ir jo lydiniai naudojami įvairiose pramonės srityse. Dėl biologinio suderamumo ir mechaninių savybių titanas ir jo lydiniai plačiai naudojami biomedicinos ir medicinos tikslams. Labiausiai paplitęs titano lydinio (Ti-6Al-4V) naudojimas. Tačiau titanas ir jo lydiniai įtraukti į sunkiai mechaniškai apdirbamų medžiagų grupę.

Mikrofrezavimo procesas panašus į frezavimo procesą tik viskas vyksta mikro lygmenyje. Mikrofrezuojant titaną ir jo lydinius susiduriama su daugybe iššūkių, su kuriais nėra susiduriama apdirbant tradiciškai. Norint pagaminti detalę norimo tikslumo ir tenkinamos paviršiaus kokybės yra labai svarbu kontroliuoti mikrofrezavimo procesą.

Baigiamojo magistro darbo tikslas atlikti gryno titano (II) mikrofrezavimo tyrimą, įvertinant pjovimo režimų įtaką apdirbamam paviršiui. Eksperimentinis planas sudarytas remiantis Taguchi metodu, kur pjovimo greitis V_c , pastūma dančiui f_z ir pjovimo gylis a_p yra pjovimo režimų parametrai ir kiekvienam iš jų parinktos 3-jų lygių vertės ir tiriama kokią įtaką daro užvartų aukščiui ir pločiui, paviršiaus šiurkštumui.

Baigiamojo magistro darbo uždaviniai:

1. Sudaryti eksperimentinį planą pjovimo režimų atžvilgiu – V_c , f_z , a_p .
2. Pasiruošimas eksperimentui:
 - a) *Kugler Micromaster 5X* staklių valdymas;
 - b) programų parengimas;
 - c) medžiagos paruošimas;
 - d) įrankių parinkimas.
3. Atlikti matavimus:
 - a) 3D paviršiaus topografijos;
 - b) paviršiaus šiurkštumo;
 - c) susiformavusių užvartų.
4. Atlikti statistinę analizę siekiant nustatyti pjovimų režimų įtaką paviršiaus šiurkštumui ir užvartų susiformavimui.
5. Pateikti rekomendacines išvadas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Titanas ir jo lydiniai

Titanas – tai pilkos spalvos metalas, kurio lydymosi temperatūra yra 1670 °C, tankis – 4,5 g/cm³ ir yra ketvirtas labiausiai gausus struktūrinis metalas esantis žemėje, lengvai deformuojamas šaltuoju ir karštuoju būdu, plastiškas. Titanas yra chemiškai aktyvus elementas ir kontaktuojant su aplinka, kurioje yra deguonies jo paviršius labai greitai oksiduojasi. Susidaręs 5–10 nm storio titano oksido (TiO₂) sluoksnis apsaugo giliau esantį metalą nuo tolimesnės korozijos [1]. Jis yra chemiškai inertiškas (nereaguoja su daugeliu rūgščių, šarmų, druskų ir organinių junginių), netirpus ir netoksiškas, todėl pasižymi geru biologiniu suderinamumu [1]. Šios TiO₂ savybės užtikrina titano ir jo lydinų tinkamumą implantacijai [1].

Grynas titanas yra minkštas metalas, kuris nepasižymi aukštomis mechaninėmis savybėmis tokiomis kaip dideliu tvirtumu ir kietumu palyginus su titano lydiniais [2]. Titano mechaninės savybės priklauso nuo priemaišų kiekio: azoto, deguonies, anglies ir vandenilio [1]. Gryno titano ir titano lydinio mechaninių savybių palyginimas pateiktas 1.1 lentelėje. Iš pateiktų reikšmių matyti, kad gryno titano ar titano lydinų savybės gerėja priklausomai nuo legiruojančių elementų ir jų kiekio [3].

1.1 lentelė. Titano ir lydinio Ti-6Al-4V mechaninės savybės

Savybės	Vienetai	Grynas titanas	Ti-6Al-4V
Tankis	g/cm ³	4,5	4,4
Kietis	HRC	10-12	30-36
Stiprio riba tempiant	MPa	240-550	930
Takumo riba	MPa	170-483	860
Tamprumo modulis	GPa	102-104	113
Tašumas	%	15-24	10
Šiluminis laidumas	W/mK	17	6,7
Maksimali darbinė temperatūra	°C	150	315

Pastaba: čia pateikiama gryno titano (skirstomo į 4-ias klases) savybių diapazonas [3]

Titano lydiniai plačiai naudojami inžinerijoje. Labiausiai naudojamas titano lydinys – Ti-6Al-4V ir iš šio lydinio gaminama daugiau nei 50 % visų pagamintų dalių [4]. Didelis susidomėjimas titano lydiniu Ti-6Al-4V yra dėl išskirtinių savybių, kurios pateiktos žemiau [2], [5]–[7]:

- Puikios stiprumo ir mechaninės savybės;
- Mažas tankis, didelis stiprio ir tankio santykis;
- Nuovargio ištvermė;
- Atsparumas korozijai esant aukštomis temperatūroms;
- Biologinis suderinamumas ir biologinis inertiškumas;

- Cheminis inertiškumas.

Titanas ir jo lydiniai stiprumu prilygsta plienui bei yra lengvesni už jį, tačiau mechaniškai sunkiai apdirbami. Dėl šios priežasties jie įtraukti į sunkiai apdirbamų (angl. difficult-to-cut) medžiagų grupę, nes apdirbimo metu susiduriama su daugybe problemų susijusių su apdirbimo procesu. Problemos su kuriomis susiduriama apdirbimo metu [2], [5], [6], [8]:

- užvartų susiformavimas;
- greitas įrankio nusidėvėjimas dėl vykstančių reakcijų tarp titano ir įrankio medžiagos esant didesnei nei 500 °C temperatūrai (įrankio medžiagos cheminis giminingumas sukelia adheziją ir chemines reakcijas) [2];
- mažas šilumos laidumas;
- užsigrūdinimo tendencija;
- aukštos pjovimo temperatūros;
- aukštas pjovimo slėgis;
- vibracijos.
- titano lydinių naudojimas yra ribotas, kai temperatūra žemesnė nei 400 °C, nes dėl mažo šilumos laidumo ir aukštos pjovimo temperatūros titanas gali užsidegti [2].

Dėl šių problemų titano lydinio (Ti-6Al-4V) apdirbimo procesas yra brangus, ir šios problemos taip pat daro įtaką gaminių kokybei [2].

Titano lydinių pritaikymo sritys:

1. Aviacijos ir aeronautikos srityse gaminami gaminiai:
 - aviacijos konstrukcijos, turbinų mentės, aviaciniai varikliai [2], [8];
 - dujų turbinų varikliai, kompresorių mentės, diskai, korpusai, variklio gaubtai, išmetimo gaubtai, tvirtinimo detalės, šilumos skydai [2].
2. Biomedicinos srityje gaminami gaminiai:
 - užkrėstų kaulų ir kremzlių pakeitimas;
 - karūnėlės ir sagtys naudojamos dantų chirurgijoje;
 - klubo ir kelio protezai, varžtai naudojamos ortopedinėje chirurgijoje.
3. Kitų sričių gaminiai:
 - mikro produktai;
 - maisto pramonės;
 - automobilių pramonės;
 - chemijos pramonės;

- naftos ir dujų gavybos.

1.2. Mikrofrezavimas

Daug veiksnių tokių kaip vibracijos, įlinkiai, temperatūros, ruošinių mikrostruktūra, įrankio briaunos geometrija, grūdelio dydis ir orientacija yra paprastai nepaisomi frezuojant tradiciniu būdu, tačiau yra labai svarbūs mikrofrezuojant. Mikrofrezavimas yra panašus apdirbimo būdas kaip ir tradicinis, bet kai kurie parametrai negali būti sumažinti analogiškai, tokie kaip dydžio efektas ir minimalus drožlės storis. Dydžio efektas turi reikšmingą vaidmenį procesų fizikoje, kuris glaudžiai susijęs su pjovimo mechanizmu. Taip pat, kontroliuoti mikrofrezavimo procesą yra kur kas sudėtingiau.

Apdirbant medžiagas mikrofrezavimu įrankiai yra labai svarbūs, bet jų gamyba yra sudėtinga. Mikrofrezos geometrija yra panaši į frezos geometriją, tik supaprastinta ir su daugybe netikslumų ir pažeidimų, kurie daro įtaką apdirbimo proceso ultrapreciziškumui. Kitas labai svarbus aspektas yra įrankio briaunos spindulys, nuo kurio priklauso minimalus drožlės storis. Faktinis įrankių pjaunamosios briaunos spindulys yra tarp 1 ir 3 μm . Tolesnis briaunos spindulio mažinimas yra ribojamas gamybos technologijų ir įrankio medžiagos grūdelių dydžio.

Prastas įrankio standumas skatina įrankio radialinį mušimą ir tai nulemia mikrofrezavimo proceso tikslumą. Netgi kelių mikronų mušimas turi didelę įtaką mikrofrezavimo procesui. Taip pat ir įrankio įlinkis tampa svarbesniu nei apdirbant tradiciškai. Įlinkis turi įtakos drožlių susiformavimui ir norimo paviršiaus tikslumui.

Mikrofrezavimo metu naudojamų įrankių funkcionalumas yra nenusipėjamas dėl greito įrankio nusidėvėjimo. Dažna to priežastis yra drožlių patekimas į pjovimo zoną. Dėl nusidėvėjusio įrankio padidės pjovimo jėgos ir tai sukels dideles apkrovas įrankio kotui.

Labai svarbu yra terminis staklių stabilumas, nes šiame mikro lygyje net labai mažas šiluminis iškraipymas gali sukelti pastebimų paklaidų. Tai taip pat galioja ir suklio šiluminiam išsiplėtimui Z ašies atžvilgiu, nes tai gali paveikti pjovimo gylį. Suklys yra neatskiriama staklių dalis ir kuo įrankio skersmuo mažesnis tuo reikalingesni aukšti suklio sūkliai mikrofrezavimo metu, kad pjovimo metu būtų užtikrintas pakankamas pjovimo greitis.

Kita labai svarbi problema yra smarkus užvartų susiformavimas, nes tai yra viena iš pagrindinių priežasčių dėl ko yra sugadinami mikrofrezuoti paviršiai, ir užvartų pašalinimas yra neįmanomas dėl techninių (padėties ir tolerancijos) bei ekonominių priežasčių.

1.2.1. Mikrofrezavimo taikymo sritys

Mikrofrezavimas plačiai taikomas daugelyje sričių. Kalbant apie geometrines savybes, kurios gali būti apdirbamos, randami tokie apdirbimo būdai: mikro skylėm - mikrogrėžimas, mikro grioveliams ir trimatėms formoms - mikrofrezavimas, mikro kaiščiam – mikrotekinimas [9].

Kalbant apie pramonės sritis kuriose taikomas mikrofrezavimo apdirbimo būdas, pagrinde reiktų išskirti:

- elektronikos [10], [11];
- biomedicinos, biotechnologijos ir medicinos [10], [11];
- gynybos [12];
- aviacijos [10], [11];
- transporto [12];
- optikos [10], [11];
- ryšių ir telekomunikacijos [12].

Žemiau pateikti tipiniai gaminamų gaminių pavyzdžiai:

- kuro įpurškimo purkštukai [9];
- mikro elektromechaninės sistemos [10];
- mikroliejimo formos ir šampai [10];
- biomedicininiai komponentai [10];
- mikro turbinos ir pompos [10];
- mikro varikliai [10];
- optiniai prietaisai [10];
- fotolitografijos kaukės [10];
- matavimo prietaisai [10].

Tobulėjant pramonei miniatiūrizacijos procesas pradėtas taikyti įvairiose srityse, kurios reikalauja labai mažų komponentų. Yra daug skirtingų miniatiūrizacijos priežasčių: sumažinti svorį, dydį, kainą ir t.t. Gaminant mažus sudėtingos formos komponentus yra labai svarbu išlaikyti aukštą tikslumą ir užtikrinti paviršiaus kokybę.

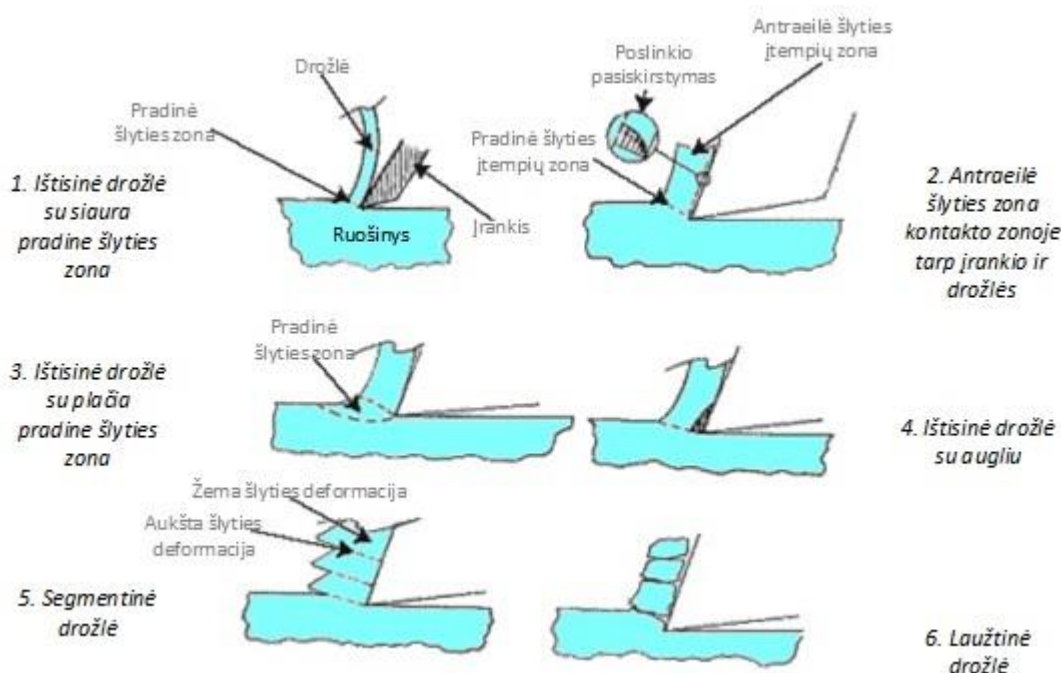
1.3. Drožlių susiformavimas

Pjovimo proceso metu susiformuoja daug drožlių, kurios turi būti efektyviai pašalintos. Be to, drožlių susiformavimas daro įtaką pjovimo jėgai, temperatūrai, įrankio nusidėvėjimui ir ruošinio paviršiaus vientisumui. Todėl labai svarbu kontroliuoti pjovimo procesą norint sumažinti neigiamą poveikį pjovimo įrankiui ir ruošinio paviršiui. Adiabatinė šlyties juostų susiformavimo procesas yra labiausiai ištirta priemonė analizuojant drožlių susiformavimą [13].

1.3.1. Drožlių morfologija ir susiformavimo mechanizmas

Drožlių morfologija gali būti analizuojama atlikus skerspjūvį, poliravimą, ėsdinimą su 4 % azoto rūgšties tirpalu etilo alkoholyje ir stebėjimą per skenuojantį elektroninį mikroskopą (angl. scanning electron microscope) [14]. Drožlių morfologija gali būti nuspėjama atlikus modeliavimo ir imitavimo procesus, nors gautos prognozės ne visada tikslios [15].

Pagal drožlių sandarą, drožlės skirstomos į ištisines (angl. continuous) ir laužtines (angl. discontinuous) (1.1 pav.). Ištisinio tipo drožlės nelūžta, o susisuka į garbaną. Plastiški metalai turi tendenciją suformuoti ištisines drožles. Ištisinės drožlės susiformavusios apdirbimo metu sąlygoja gerą paviršiaus užbaigimą, tačiau jų surinkimas ir utilizavimas gali sukelti problemų.



1.1 pav. Drožlių tipai [16]

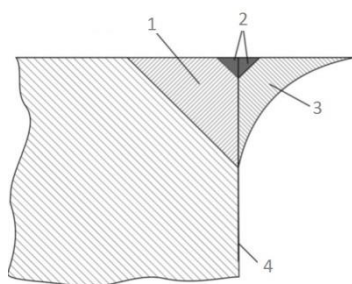
Laužtinės drožlės taip pat vadinamos dantytomis (angl. serrated) [17], segmentinėmis (angl. segmented) [18]. Segmentinė drožlė dėl šlyties pasiskirsto į segmentus, todėl lengvai atsiskiria nuo ruošinio į atskirus gabalus. Drožlių segmentacija pagal šlyties lokalizaciją yra svarbus procesas pastebimas tam tikrame pjovimo greičių diapazone. Būtent šis reiškinys pageidaujamas mažinant pjovimų jėgų lygį ir dėl to pagerėja drožlių pašalinimas [15]. Didinant gamybos tempus ir mažinant apdirbimo išlaidas labai naudinga prognozuoti pjovimo sąlygas, kurios lemia dantytų drožlių susidarymą [19]. Tačiau Sun'as ir kiti [20] nurodė, kad laužtinių drožlių susidarymą sukelia ciklinės jėgos ir įrankio vibracijos. Pjaunant titaną ir jo lydinius dažniausiai pasitaiko segmentinės drožlės, nes titano medžiaga pasižymi mažu šilumos laidumu.

Tačiau drožlių susiformavimo mechanizmas vis dar nėra visiškai suprantamas, nors pjovimo proceso nestabilumas ir lūžių inicijavimas bei augimas yra dvi pagrindinės teorijos

palaikančios šį reiškinį [17]. Titano lydinių apdirbimo mechanizmas paprastai yra pagrįstas termoplastiniu nestabilumu (dar vadinamu adiabatine šlytimi) kartu su pradine šlyties zona, kuri įvyksta, kai terminis suminkštėjimo santykis viršija sukietėjimo santykį [21].

1.4. Užvartų susiformavimas

Techniniuose brėžiniuose ar projektuojant detales CAD/CAM aplinkoje, detalės suprojektuoti paviršiai, briaunos ir kampai yra idealūs arba be nukrypimų, todėl apdirbimo metu plastiškai susiformavusios iškyšos yra nepageidaujamos. Nepageidaujamų iškyšų susiformavimo procesą galima vadinti užvartų susiformavimu [22], kurios atspindi nukrypimus nuo norimų gauti rezultatų. Pagal ISO 13715 (2000) [23] standartą, išorinė briauna (1.2 pav.) vaizduojama be užvartų (angl. burr-free), teigiama/neigiama briauna (angl. sharp edge) ar su užvartomis (angl. burr).



1.2 pav. Užvartų apibrėžimas pagal ISO 13715 (2000) [23] standartą, kur 1. briauna be užvartų; 2. teigiama/neigiama briauna; 3. briauna su užvartomis; 4. teorinė ruošinio briauna.

Šaltinio autoriai [22] pateikė 3 pagrindines priežastis, kodėl užvartos yra nepageidaujamos ir turėtų būti pašalintos arba sumažintos apdirbimo proceso metu:

1. joms susiformuojant nukrypstama nuo suprojektuotos detalės geometrijos;
2. funkcionalumo rizika (problemos surenkant, tarpelis tarp detalių, nutrupėjusios užvartos gali patekti į įrenginius ir juos sugadinti);
3. rizika susižeisti operatoriams, ypač pirštus kai liečiama aštri detalės briauna su užvartomis.

Mikroapdirbimo metu užvartų susiformavimas yra pagrindinis ribojantis veiksnys, kuris veikia geometrijos tikslumus ir tolerancijas [10], [24], [25]. Be to, atliekant mikroapdirbimą užvartos dažniausiai susiformuoja didesnės nei apdirbant tradiciškai [25]. Susiformavusių užvartų papildomas pašalinimas yra techniškai sudėtingas. Be to, užvartų pašalinimas mikrofrezavimo būdu yra sudėtingesnis nei tradicinio, dėl to mikrofrezavimo apdirbimo būdo panaudojimas yra ribotas [26], nes jų pašalinimas tradiciniu būdu (šveitimu, graviravimu, ultragarsu) yra sudėtingas ir gali turėti įtakos detalės matmenų pakitimams ir paviršių pažeidimams [27].

Užvartų pašalinimo procesas atima daug laiko, brangiai kainuoja ir neduoda jokios pridėtinės vertės. Šaltinio autoriai [22] atliko skaičiavimus ir pateiktose išvadose matoma, kad

taikant užvartų pašalinimo procesą, savikainos kaštai išaugtų 9 % ar daugiau, ir Vokietijoje tai siektų apie 500 milijonų eurų per metus. Taigi užvartų pašalinimas turi didelį ekonominį poveikį visam apdirbimo procesui. Taip pat šaltinio autoriai [22] pateikė pagrindinius faktorius, kurie daro įtaką užvartų susiformavimo procesui:

- įrankis ir jo geometrija;
- naudoti pjovimo – aušinimo skysčiai;
- ruošinio geometrija;
- ruošinio medžiaga;
- apdirbimo proceso operacijų seka;
- įrankio kelio pasirinkta strategija;
- pjovimo sąlygos.

Literatūroje randama daug veiksnių darančių įtaką užvartų susiformavimui – pjovimo greitis, gylis, nedeformuotos drožlės storis, įrankio aštrumas, įrankio pastūma ir ruošinio medžiaga [8], [24], [12], taip pat, kuo plastiškesnė ruošinio medžiaga, tuo didesnės užvartos susiformuos [8], [24], [28], kita vertus, apdirbant kietesnę medžiagą greičiau dėvisi įrankis (freza) ir tai taip pat turi įtakos užvartų susiformavimui [5], [8], [24]. Mažiausios užvartos susiformuoja esant mažiems greičiams ir aukštomis apsisukimo pastūmoms [5], [25], didėjant pjovimo greičiui – didėja užvartos, pastūmos didinimas yra ribotas danties pastūmos [5].

Camara ir kiti [10] atliko tyrimus ir nustatė įrankio skersmens, dantų skaičiaus ir pjovimo gylio daromą įtaką užvartų aukščiui ir storiui. Didinant pastaruosius pjovimo parametrus, sumažėja užvartos aukštis. Kiwanto ir kiti [29] teigia, kad mikrofrezavimo metu užvartų susiformavimas turi didelę įtaką ruošinio kokybei, nes užvartų dydis (plotis, aukštis) gali pasiekti pjovimo įrankio skersmens dydį.

Daugelis autorių atliko pasirinktos frezavimo strategijos tyrimus ir nustatė, kokią svarbą turi pasirinkta strategija. Frezavimas pagal pastūmą suformuoja didesnio dydžio užvartas nei frezavimas prieš pastūmą. Frezuojant pagal pastūmą pastebimos didesnės banguotos užvartos, kai frezuojant prieš pastūmą pastebimos mažesnės, dantyto (apdriskusio) tipo užvartos [10], [24], [25], [28].

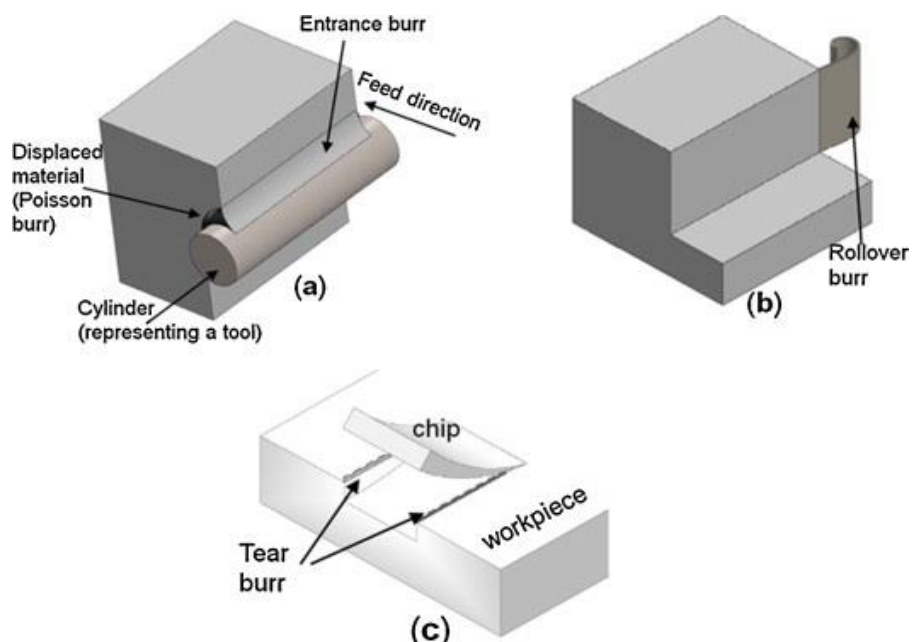
Šaltinio autoriai teigia, kad ne tik pasirinkti pjovimo režimai, bet ir pasirinkta pjovimo strategija (pagal ir prieš pastūmą) turi įtakos užvartų susiformavimui, kai užvartų aukštį ir plotį stipriai veikia danties pastūma, pjovimo plotis ir pasirinkta strategija (frezuojant prieš pastūmą susiformuoja platesnės ir lenktos formos užvartos). Taip pat pasirinkta pjovimo strategija turi didelės įtakos užvartų storiui (frezuojant prieš pastūmą susiformuoja plonesnės užvartos) [30].

Kadangi yra atlikta daug tyrimų apie užvartų susiformavimą apdirbant metalines medžiagas, literatūroje galima rasti daug skirtingų teorijų ir klasifikacijų. Išskiriamos dvi pagrindinės klasifikacijos:

1. Klasifikacija pagal užvartų formavimosi mechanizmą

Gillespe klasifikuoja užvartas pagal jų formavimosi mechanizmą. Yra keturi užvartų tipai:

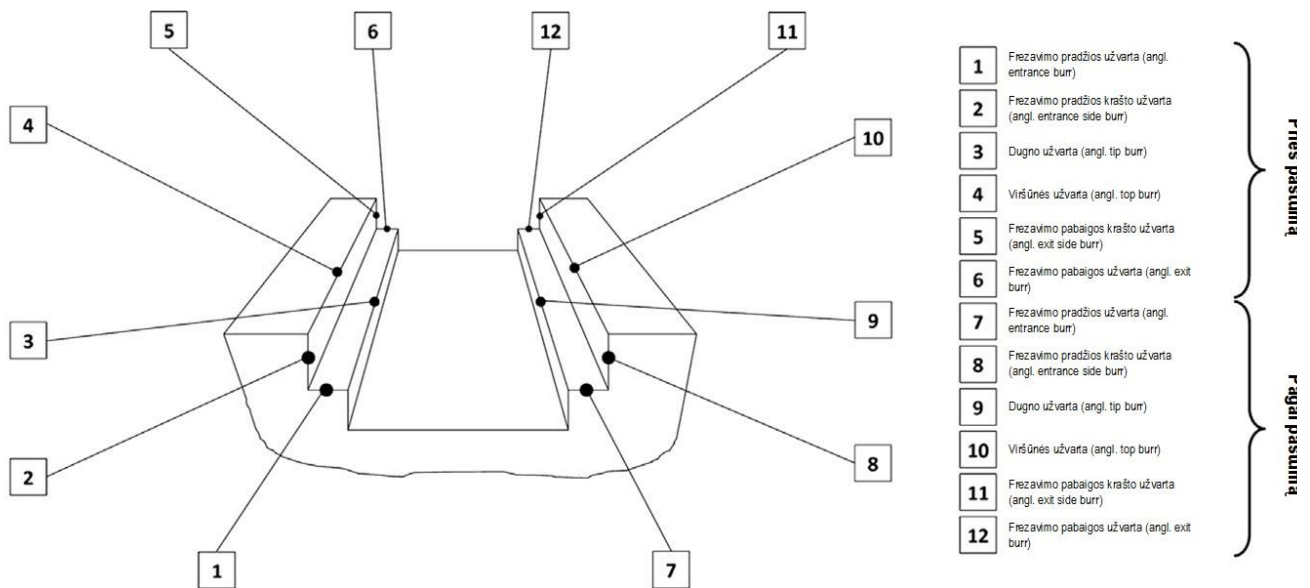
- a. Auglinė užvarta (angl. poisson burr) (1.3 pav. (a)). Šios užvartos tai – medžiagos atsiradimo tendencija šonuose, kai medžiaga yra spaudžiama. Auglinių užvartų atveju medžiaga suspaudžiama tol, kol atsiranda nuolatinė plastinė deformacija. Pavadinimas auglinė užvarta (angl. poisson burr) yra kilusi iš (angl. Poisson's Ratio) Puasono koeficiento, kuris atspindi skersinę medžiagų deformaciją [22], [31], [32].
- b. Susisukanti užvarta (angl. roll-over burr) (1.3 pav. (b)). Šios užvartos – tai iš esmės drožlės kurios yra išstumtos iš pjovimo kelio, o ne nupjautos. Dažniausiai šios užvartos būna ilgos ir susiformuoja pjovimo pabaigoje [22], [31], [32].
- c. Plyštanti užvarta (angl. tear burr) (1.3 pav. (c)). Šios užvartos susiformuoja, kai medžiaga yra plėšiama nuo ruošinio medžiagos paviršiaus, o ne pjaunama. Šios užvartos panašios į kirtimo operacijų metu susidariusias užvartas. [22], [31], [32].
- d. Nupjaunama užvarta (angl. cut-off burr) [22], [31], [32]



1.3 pav. Užvartų tipai [22]

2. Klasifikacija pagal užvartų formavimosi mechanizmą, poziciją ir formą.

Kitas būdas klasifikuoti užvartas yra pagal formavimosi mechanizmą, bet tuo pačiu atsižvelgiant į užvartų vietą ir formą (1.4 pav.).



1.4 pav. Užvartų pozicija pagal vietą [30]

Piquard'as ir kiti [30] apibūdino 12 skirtingų užvartų pozicijų. Šaltinio autoriai [30] suskirstė užvartas pagal pasirinktą frezavimo strategiją (pagal ir prieš pastūmą) ir be frezavimo pabaigos, krašto ir viršūnės užvartų, jie pridėjo dugno, frezavimo pradžios ir krašto užvartas. Dugno užvartos (angl. tip burr) yra laikomos frezavimo pabaigos užvartomis. Jas suformuoja galinės frezos galiukas žemiausiame dugno krašto taške [30].

Šaltinio autoriai [24] paminėjo, kad nėra būdo kaip būtų galima išmatuoti susisukusias 3D formos užvartas ypač mikro lygmenyje. Tačiau jie teigia, kad galima atlikti kiekybinius užvartų pločio ir aukščio matavimus.

Aurich'as ir kiti [22] klasifikuoja matavimo metodus į:

- vienmačius, dvimačius, trimačius;
- ardomus ir neardomus;
- kontakčius ir bekontakčius;
- proceso metu ir ne proceso metu.

Skirtingų užvartų aptikimo ir matavimo metodų klasifikacija pateikta 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Užvartų aptikimo ir matavimo metodai

Ne proceso metu				Proceso metu
Kontaktis	Bekontaktis			
	Optinis		Elektromechaninis	
Zondavimo metodas	Optinis mikroskopas	Šviesos padalijimo metodas	Sūkurinės srovės jutiklis	Proceso stebėjimas
Metalografinis metodas	Fibroskopas / endoskopas	Lazerinė trianguliacija	Indukcinis jutiklis	Jėgos
	Skenuojantis elektroninis mikroskopas	Automatinio fokusavimo metodai	Kompiuterinė tomografija	Skleidžiamo garso analizė
Konfokalinė (angl. confocal) mikroskopija				

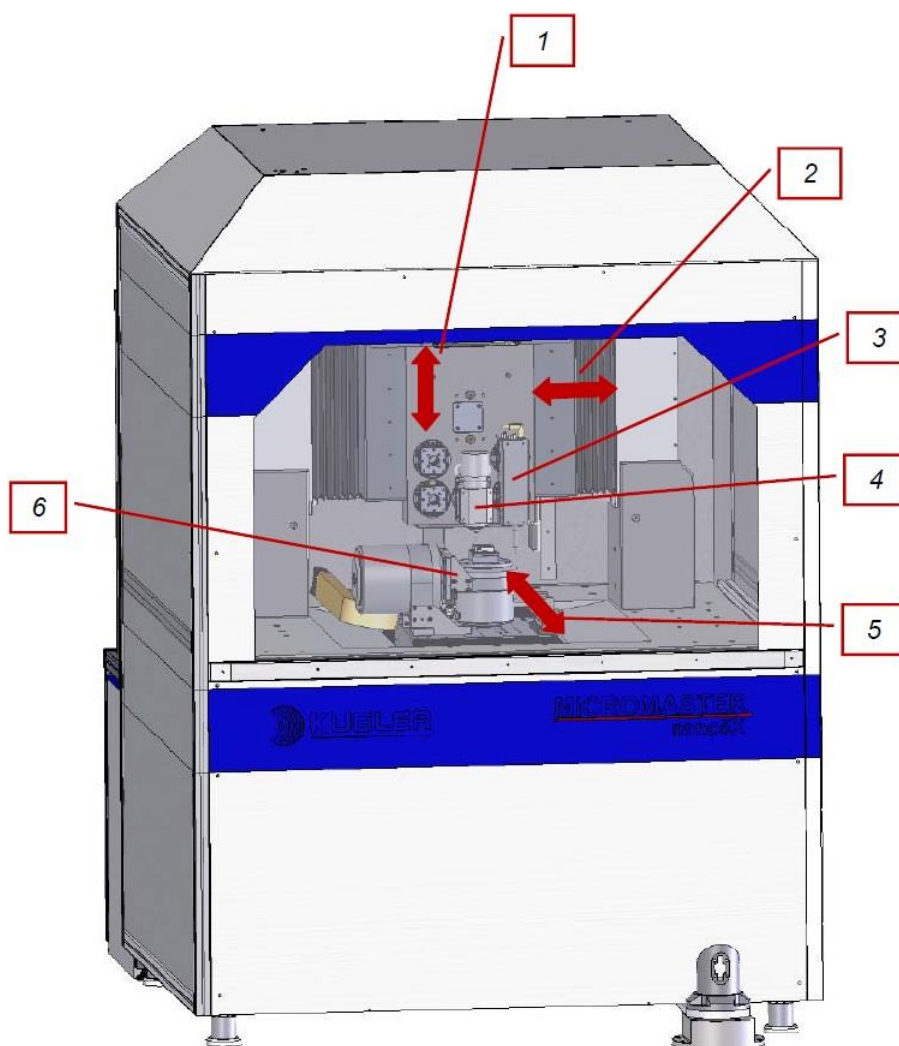
Zondavimo metodai yra tinkami matuoti užvartų aukštį, bet realus profilis negali būti išmatuotas, nes gautos reikšmės gali būti paveiktos liestuko formos. Visų kontakčių matavimo metodų naudojimas yra ribotas dėl medžiagos standumo, nes užvartos gali būti pažeistos ar suspaustos dėl kontakto metu veikiančių jėgų [22].

Ardymo metodas taikomas metalografiniams užvartų skerspjūviams. Šis metodas leidžia matuoti skerspjūvio užvartų reikšmes ir taip pat užvartų kietumą ir stuktūrinius pakitimus medžiagoje po atlikto medžiagos apdirbimo. Tai vienintelis būdas matuoti užvartų storį ir ilgį, ypač susisukusias, spiralines užvartas [22].

2. Eksperimentinė dalis

2.1. Mikrofrezavimo staklės

Mikrofrezavimo bandymai atlikti su penkių ašių mikro-frezavimo staklėmis *Kugler*[®] *Micromaster 5X* (2.1 pav.). Frezavimo staklės laikomos kondicionuojamoje patalpoje, kurios temperatūra yra $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, taip užkertant kelią bet kokiems įmanomiems šilumos iškreipymams. Be to, staklių pagrindas sudarytas iš granito, kuris užtikrina didelį pagrindo standumą.



2.1 pav. Kugler[®] Micromaster 5X: 1 – Z ašis; 2 – X ašis; 3 – Matavimo sistema ruošiniui matuoti; 4 – Suklys; 5 – Y ašis; 6 – A + C ašys [33].

Staklių suklys naudojant orinius guolius gali pasiekti 180 000 aps./min. Šio suklio trūkumas – šiluminis plėtimasis Z ašies kryptimi, kuris gali siekti nuo kelių iki dešimčių mikronų, tačiau šiose staklėse įmontuotas aukštos rezoliucijos sukūrinės srovės jutiklis, kuris stebi ir kompensuoja šiluminį išsiplėtimą Z ašies kryptimi. Visų ašių pozicionavimo tikslumas – 0,3 μm ir maksimalus linijinis ašių greitis – 6 000 mm/min.

2.2. Mikrofrezavimo staklių paruošimas eksperimentams atlikti

Programos parengimas.

Mikrofrezavimo bandymui atlikti buvo parengta 4 žingsnių frezavimo programa, kuri kartojama prieš kiekvieną griovelio frezavimą, taip pat keičiamos 000 reikšmės.

;Įrankio matavimas	– Keičiami suklio sūkliai.
;Sūklių įvedimas	
s000 m3	
g27 a2	
g182	
g121 e5	
g131 t0	
;Pozicija	– Keičiama griovelio pozicija.
f600	
<i>;griovelio pozicija X</i>	
x000 y0	
z10	
;Įbrėžimas	– Keičiamas Z aukštis, norint sužinoti aukščių skirtumą tarp ruošinio ir įrankio.
f100	
y2	
<i>;keičiamas Z aukštis</i>	
z-000	
y-2	
z2	
y2	
;Lipnios juostelės prilipdymas ir aušinimo įjungimas	– Klijuojama lipni juostelė prie ruošinio krašto ir įjungiamas suspaustas oras.
;Griovelio frezavimas	– Įvedamas Z aukštis.
f600	– Įvedamas f greitis.
y30	
<i>;įvedamas aukštis Z</i>	
z-000	
<i>;įvedamas greitis f</i>	
f000	
y-75	
f600	
z20	
y90	

Norint užtikrinti eksperimento tikslumą, prieš kiekvieną griovelio frezavimą buvo atliekama procedūra, kuri skirta suklio šiluminiam plėtimuisi stabilizuoti.

Staklių suklio šiluminio plėtimosi stabilizavimo veiksmai.

- Sukliui programiškai įvedami norimi sūkliai ir paliekamas suktis ne mažiau nei 5 minutes arba kol plėtimasis stabilizuojasi. Buvo stebima „Spindle Expansion HF“ skalės reikšmė

(2.2 pav.) ir jei reikšmė svyruoja tarp 0,01 – 0,10 μm , buvo pasirinkta, kad suklio plėtimasis stabilizavosi.

- Kai suklio plėtimasis stabilizuojasi, G kodu (G182) aktyvuojamas automatinis suklio kompensavimas.

Mikrofrezavimo staklių įrankio patikros veiksmai.

- Lazerine įrankių matavimo sistema *BLUM* išmatuojamas įrankio ilgis.
- Norint įsitikinti, ar įrankio aukštis yra reikiamo aukščio, mažu greičiu ir pastoviu Z ašies žingsniu buvo atliekami įbrėžimai ant titano (Ti 2) ruošinio paviršiaus, numatomose griovelių mikrofrezavimo pozicijose.
- Atlikus įbrėžimus ir prieš pradėdant griovelio frezavimą, buvo priklijuojama lipni juostelė, Y ašies kryptimi, kuri yra pagaminta iš anglies, laidži elektrai.
- Įjungiamas aušinimas. Suspaustas oras buvo pučiamas į kontakto zoną tarp įrankio ir ruošinio.
- Atliekamas griovelio frezavimas pasirinktais apdirbimo parametrais. Taip pat suspaustu oru drožlės prilipdavo prie lipnios juostelės.



2.2 pav. Suklio šiluminio plėtimosi stebėjimo langas

2.3. Medžiaga ir pasirinkimas

Bandymui atlikti buvo naudojamas komerciškai grynas titanas (Ti 2), kurio cheminė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje. Šios klasės titanas pasižymi puikiu tvirtumu – tankio santykiu ir geru atsparumu korozijai. Dėl išskirtinio biologinio suderinamumo komerciškai grynas titanas plačiai naudojamas medicinos sektoriuje.

2.1 lentelė. Cheminė sudėtis

C, %	N, %	Ti, %	Fe, %	O, %	H, %
≤ 0,08	≤ 0,03	≤ 99,325	≤ 0,30	≤ 0,25	≤ 0,015

Eksperimentui atlikti buvo naudota titano (Ti 2) plokštelė, kurios matmenys – 68 x 20 x 5 mm (2.3 pav.).



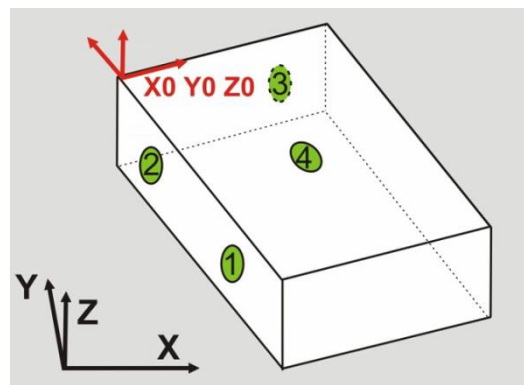
2.3 pav. Titano (Ti 2) plokštelė

Ruošinys įtvirtintas mechaniniais spaustuvais, Y ašies kryptimi (2.4 pav.). Naudojant *Renishaw*[®] kontaktinį liestuką, buvo atlikta ruošinio aukščio ir pavertimo kompensacija, ir nustatytas ruošinio atskaitos taškas, kaip pavaizduota 2.5 pav.. Norint įsitikinti, ar X/Y plokštuma yra lygi, buvo atlikti ruošinio paviršiaus matavimai (2.6 pav. prieš) naudojant *Renishaw*[®] kontaktinį liestuką. Matavimų reikšmės pateiktos 2.2 lentelėje. Dėl didelio standartinio nuokrypio, kuris buvo lygus 0,01133 mm, buvo nuspręsta atlikti paviršiaus frezavimą su 3 mm skersmens freza (2.7 pav.).

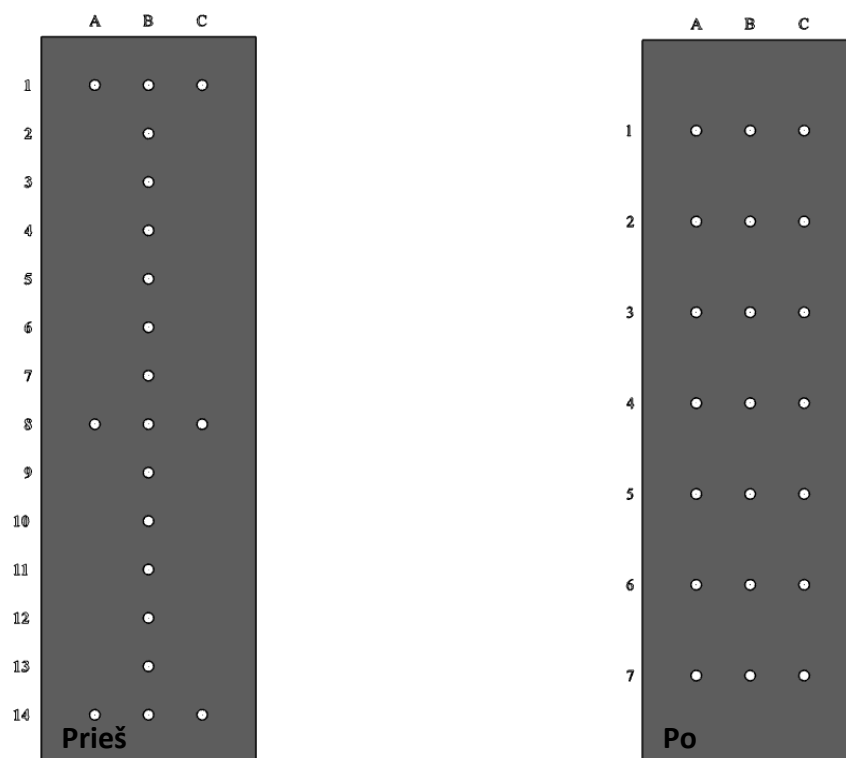
Atlikus pakartotinius plokštumos X/Y matavimus (2.6 pav. po), gautas standartinis nuokrypis – 0,00085 mm.



2.4 pav. Ruošinio įtvirtinimas



2.5 pav. Aukščio ir pavertimo kompensacija, kur – 1, 2, 3, 4 taškai – matavimo pozicijos.



2.6 pav. Paviršiaus matavimų schema

2.2 lentelė. X/Y plokštumos matavimų rezultatai atlikti su *Renishaw*[®] kontaktiniu liestuku

Nr.	PRIEŠ			PO		
	A	B	C	A	B	C
1	81,74610776	81,77631919	81,78284911	81,69382662	81,69237946	81,69211456
2		81,77930866		81,69306282	81,69237593	81,69177767
3		81,78079286		81,69344518	81,69279676	81,69232835
4		81,78016969		81,69325318	81,69297554	81,69236378
5		81,77907822		81,69283780	81,69301400	81,69198414
6		81,78048231		81,69204671	81,69228817	81,69190202
7		81,78204307		81,69058244	81,69111732	81,69059959
8	81,77975219	81,78421598	81,7725335			
9		81,7843672				
10		81,78708863				
11		81,79205244				
12		81,79588593				
13		81,79748562				
14	81,79451551	81,79782577	81,77647498			
Standartinis nuokrypis	0,011337264			0,000851263		

2.4. Įrankių parinkimas

Griovelių mikrofrezavimas atliktas su *Kyocera*[®] gamintojo pagamintomis kotinėmis griovelinėmis 2 ašmenų frezomis (2.7 pav.), kurių skersmuo 0,3 mm (2.3 lentelė, Nr. 1) ir padengtos aliuminio titano nitrido (AlTiN) danga (2.3 lentelė). Kiekvienam eksperimentui (2.4 lentelė) atlikti buvo naudojama nauja freza.



2.7 pav. Kotinė galinė 2 ašmenų freza [34]

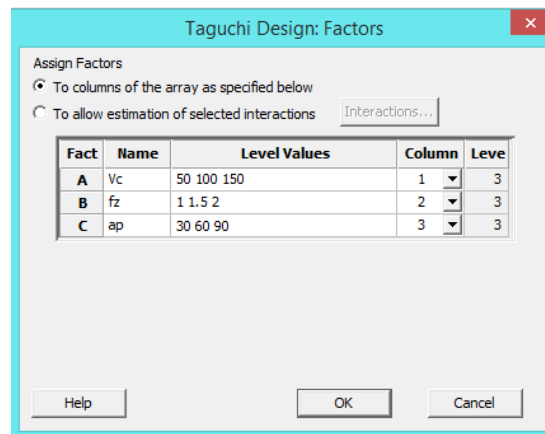
Ruošinio paviršiaus lyginimui buvo naudojama freza – Nr. 2 (2.7 pav.) kurios matmenys pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Įrankio matmenys ir padengimas

Nr.	Matmenys (mm)				AlTiN danga			
	$D^{+0,00mm}_{-0,02mm}$	d^{h6}	l	L	GPa	k_{tr}	μm	$^{\circ}C$
1.	0,30	3	0,90	38	38	0,7	1–3	900
2.	3	3	9,00	38				

2.5. Eksperimentinis projektavimas

Eksperimentinis planas sudarytas remiantis Taguchi metodu (2.8 pav.), kur pjovimo greitis V_c , pastūma dančiui f_z ir pjovimo gylis a_p yra įvesties kintamieji (faktorai), kiekvienam iš jų parinktos 3-jų lygių vertės. Pjovimo režimai parinkti remiantis įrankio ir staklių gamintojo rekomendacijomis. Eksperimento tikslas – ištirti kaip įvesties kintamieji daro įtaką užvartos aukščiui ir plotiui, paviršiaus šiurkštumui, kur pastarieji – išvesties kintamieji.

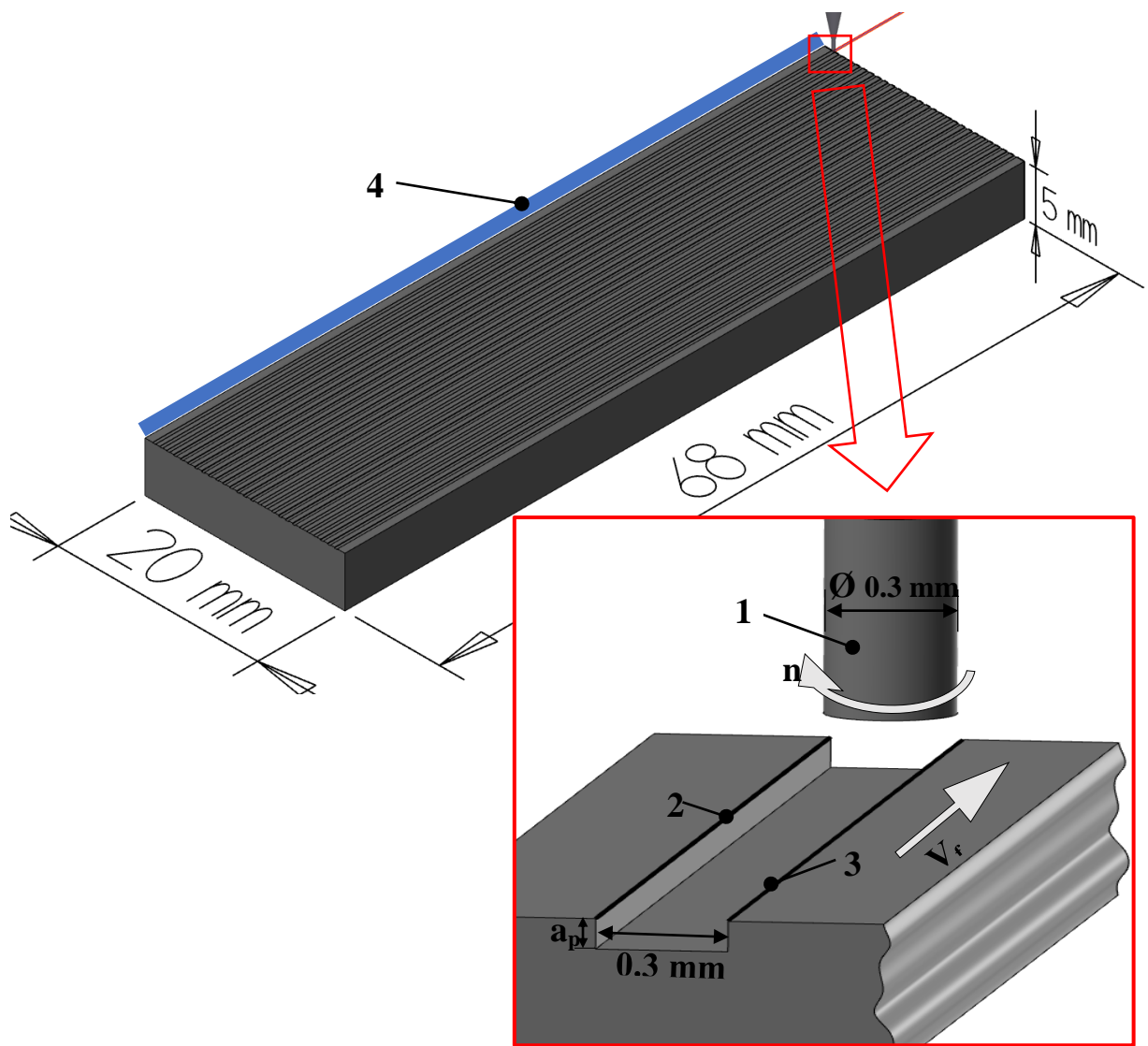


2.8 pav. Minitab[®] programinės įrangos įvesties langas

Atliekant užvartos aukščio ir pločio matavimus buvo atsižvelgiama į frezavimo būdą, t.y. prieš ir pagal pastūmą (2.9 pav.). Frezuojamų griovelių plotis lygus įrankio skersmeniui. Kiekvienas eksperimentas pavaizduotas 2.4 lentelėje kartojamas 3 kartus. Kiekvienam eksperimentui naudojama nauja freza, eksperimente sunaudotos 9 frezos.

2.4 lentelė. Detalus eksperimentinis planas

Eksperimento Nr.	Kartojimas	V_c , m/min	f_z , $\mu\text{m}/\text{dančiui}$	a_p , μm
1	1	50	1	30
	2			
	3			
2	1	50	1,5	60
	2			
	3			
3	1	50	2	90
	2			
	3			
4	1	100	1	60
	2			
	3			
5	1	100	1,5	90
	2			
	3			
6	1	100	2	30
	2			
	3			
7	1	150	1	90
	2			
	3			
8	1	150	1,5	30
	2			
	3			
9	1	150	2	60
	2			
	3			



2.9 pav. Griovelių frezavimo schema, kur 1 – įrankis, 2 – frezavimas pagal pastūmą, 3 – frezavimas prieš pastūmą, 4 – lipni juostelė drožlių surinkimui, n – suklio sukimosi kryptis, V_f – pastūmos kryptis, a_p – pjovimo gylis

2.6. Drožlių stebėjimas

Surinktos drožlės mikrofrezavimo metu buvo apžiūrėtos naudojantis skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) *Quanta 450* (2.10 pav.).

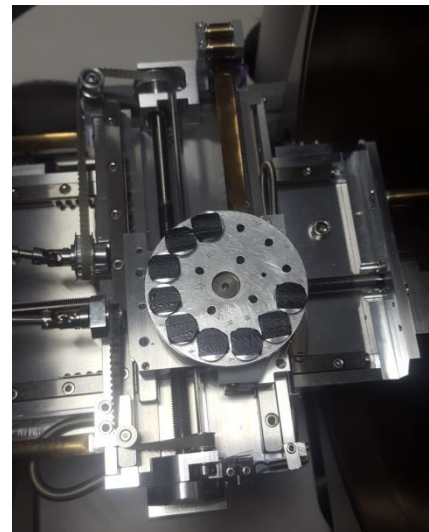


2.10 pav. Skenuojantis elektroninis mikroskopas *Quanta 450*

Iš lipnios juostelės prie kurios buvo prilipusios drožlės buvo iškerpama vidurinė juostelės dalis ir priklijuojama prie mėginio laikiklio (2.11 pav.) ir sudedami į SEM vakuuminę kamerą (2.12 pav.).



2.11 pav. Surinktos drožlės priklijuotos prie mėginio laikiklio



2.12 pav. SEM vakuuminė kamera

Atlikti drožlių kiekybinę ir matmenų analizę yra sunki užduotis dėl sudėtingų geometrinių formų ir mažų matmenų. Drožlių nuotraukos atlikus stebėjimą per skenuojantį elektroninį mikroskopą (2.10 pav.), kur paveikslų numeriai atitinka eksperimento seką pateikta 2.4 lentelėje.

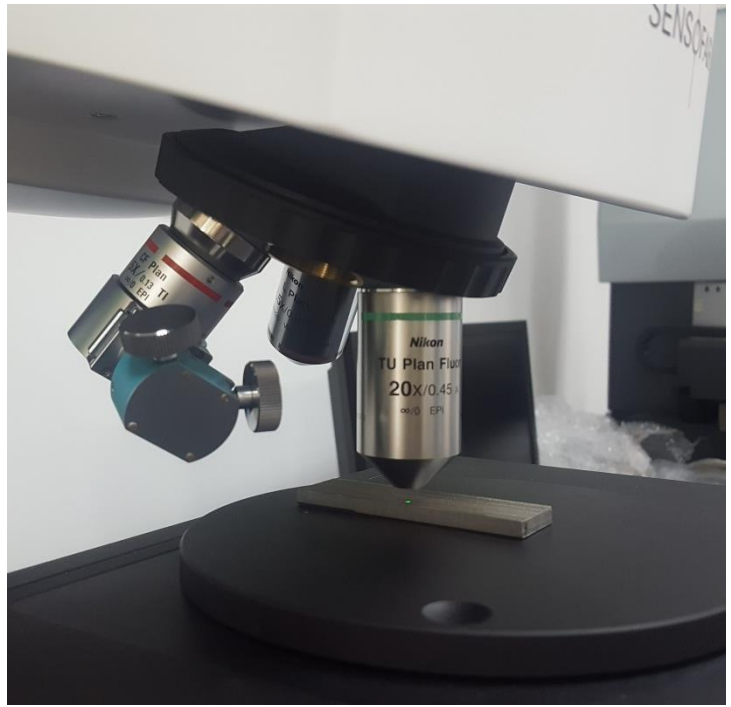
2.7. Paviršiaus topografija

Frezuotų paviršių topografija atlikta naudojantis 3D bekontaktį paviršiaus skaitytuvą *Sensofar S neox* (2.13 pav.). Prietaise įrengtas *Nikon 20x* objektyvas (2.14 pav.) kurio stebėjimo laukas $877 \times 660 \mu\text{m}^2$ ir vertikali raiška – 8 nm. Norint gauti daugiau informacijos apie paviršiaus topografiją buvo didinamas stebėjimo laukas iki $877 \times 2146 \mu\text{m}^2$. Tai buvo atlikta *SensoScan* programinės įrangos pagalba, kur buvo sujungtos 4 nuotraukos paeiliui (1 X 4) ir naudojamas 25 % nuotraukos persidengimas.

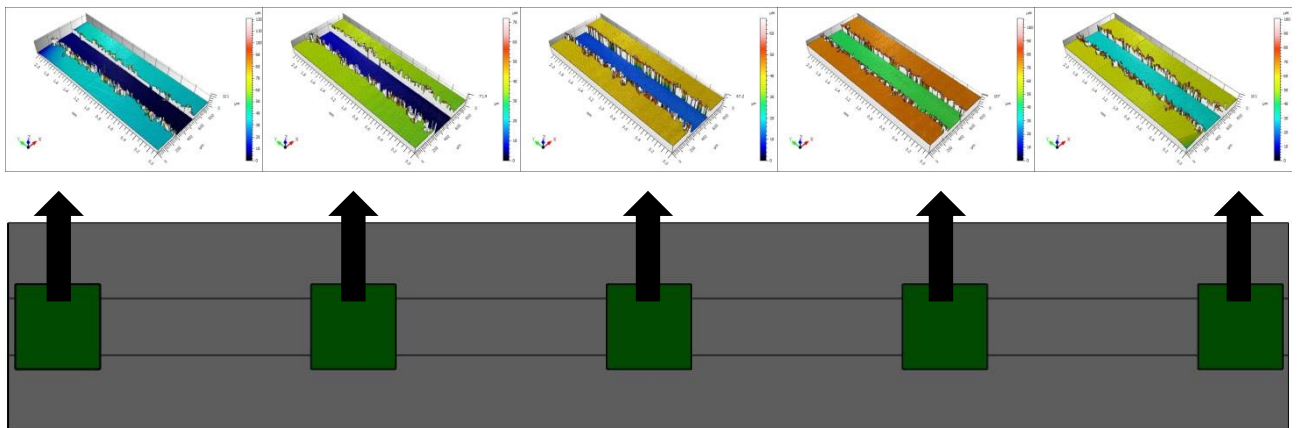
Griovelį topografija atlikta išilgai frezuoto griovelio 5 skirtingose pozicijose (2.15 pav.) naudojant konfokalinį optinį profilio matuoklį. Paveiksle pavaizduotos griovelio skanavimo pozicijos (žali kvadratai) ir viršuje gautos *Mountains*[®] skirtingų pozicijų paviršiaus topografijos. Šios topografijos buvo naudojamos vidutinių aukščių S_a , S_q ir paviršiaus šiurkštumo R_a matavimams atlikti.



2.13 pav. Sensofar S neox įrenginys

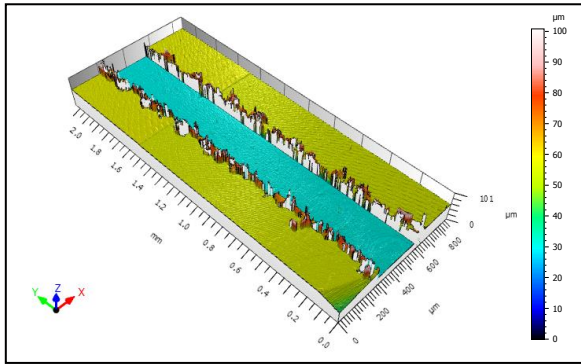


2.14 pav. Titano ruošinio paviršiaus skenavimas su Sensofar S neox įrenginiu

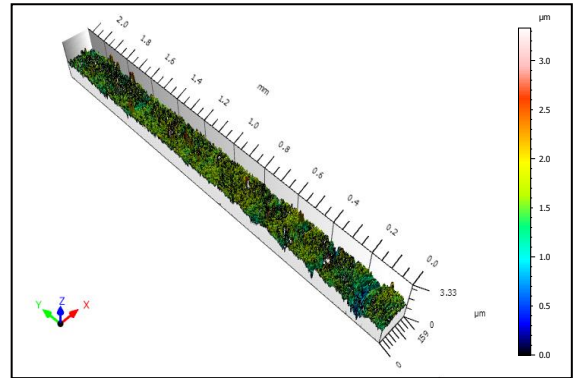


2.15 pav. Paviršiaus topografijos matavimo pozicijos

Paviršiaus savybės įvertintos naudojant *Mountains*[®] paviršiaus vaizdavimo ir metrologijos programinę įrangą ir priimta, kad paviršiaus kokybei įvertinti bus naudojamos paviršiaus šiurkštumo R_a , vidutinio aritmetinio aukščio S_a ir vidutinio kvadratinio aukščio S_q reikšmės. S_a ir S_q matavimams atlikti buvo iškirpti 2 mm x 159 μ m stačiakampiai (2.17 pav.) iš griovelio dugno (2.16 pav.)

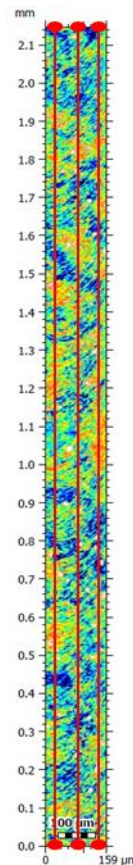


2.16 pav. Paviršiaus topografija atlikta su *Sensofar S neox*



2.17 pav. Iškirptas griovelio dugno stačiakampis 2 mm x 159 μm

Paviršiaus šiurkštumui R_a matuotas profilio metodu. Iš iškirpto griovelio dugno stačiakampio buvo brėžiamos 3 linijos, kurios pažymėtos raudonai (2.18 pav.) ir iš gautų reikšmių skaičiuojamas vidurkis.

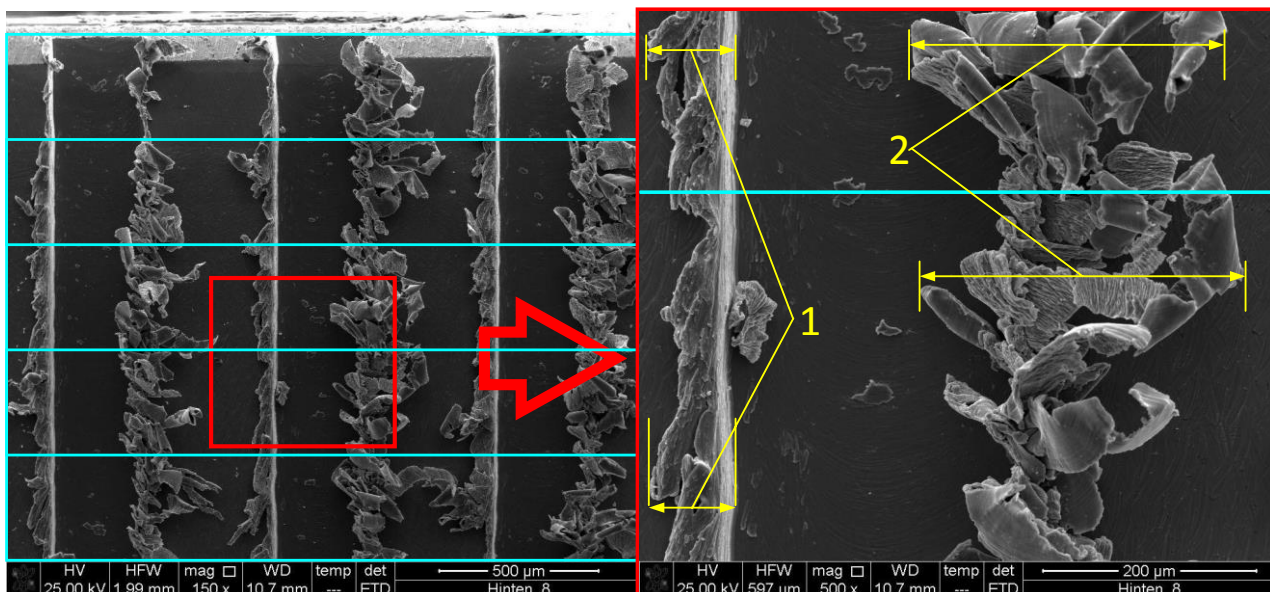


2.18 pav. Paviršiaus šiurkštumo R_a matavimo pavyzdys

2.8. Užvartų stebėjimas

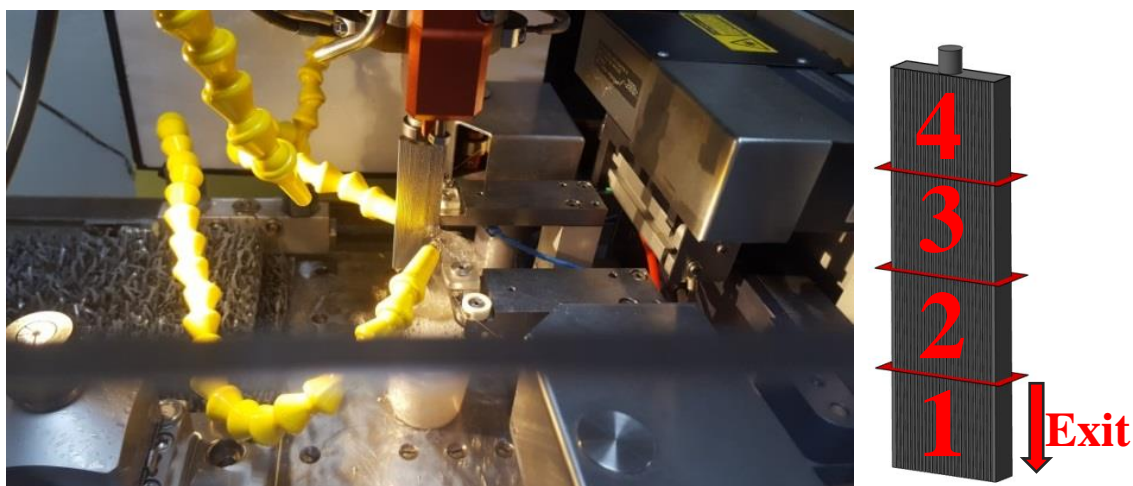
Užvartų pločiui ir aukščiui matuoti naudota *ImageJ*[®] vaizdo apdorojimo programine įranga. Naudojant SEM *Quanta 450* mikroskopą buvo daromos nuotraukos užvartų pločio matavimams atlikti. Visos nuotraukos buvo daromos vienodu priartinimu – 150 kartų. Norint gauti

užvartų pločio skaitines reikšmes, nuotraukos buvo padalintos į 5 dalis ir kiekvienoje tų dalių matuojama plačiausia vieta, įvertinant frezavimo būdą, t.y. pagal ir prieš pastūmą. Iš gautų rezultatų buvo skaičiuojamas vidutinis užvartos plotis. 2.19 pav. pateiktas užvartų pločio matavimo pavyzdys.



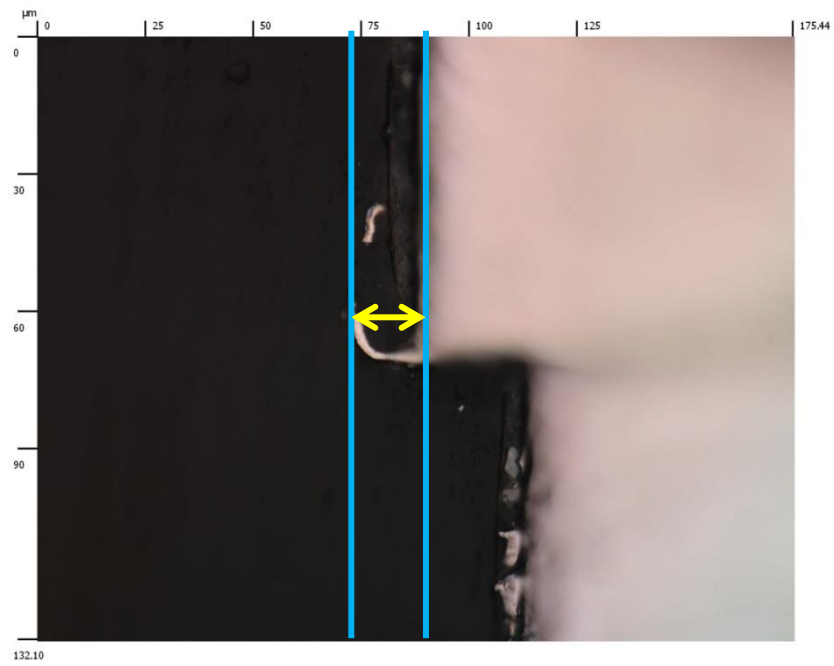
2.19 pav. Užvartų pločio matavimo pavyzdys, kur 1 – frezavimas pagal pastūmą, 2 – frezavimas prieš pastūmą

Prieš atliekant užvartų aukščio matavimus, titano plokštelė buvo supjaustyta į 4 lygias dalis su mikroerozinėmis apdirbimo staklėmis SARIX SX–200–HPM (2.20 pav.). Supjaustytos gryno titano plokštelės buvo aplietos derva ir atliktas mikrošlifas.



2.20 pav. Pjovimo procesas apdirbant Saric SX–200–HPM staklėmis

Užvartų aukščio nuotraukoms daryti buvo naudojamas Sensofar S neox ir jame įrengtas Nikon 20x objektyvas. Užvartos aukštis buvo matuojamas įvertinant frezavimo būdą (pagal ir prieš pastūmą), matavimo pavyzdys pavaizduotas 2.21 pav. Iš atliktų aukščio matavimų buvo gautas užvartos aukščio vidurkis.



2.21 pav. Užvartų aukščio matavimo pavyzdys

3. Rezultatai

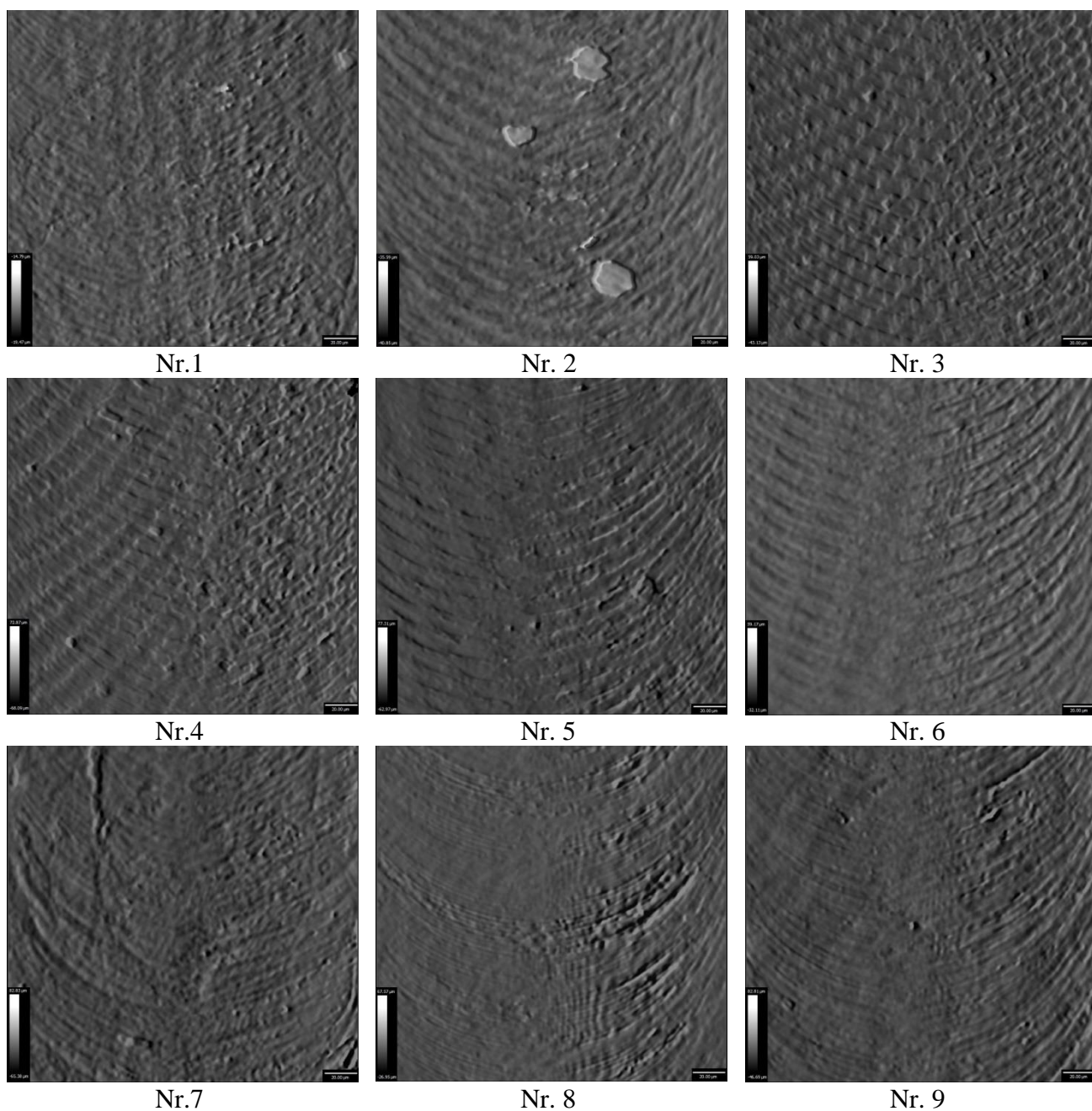
3.1. Paviršiaus kokybės įvertinimas

Atlikus paviršiaus matavimus *Mountains*[®] programine įranga, visos gautos matavimų reikšmės pateiktos pagal vidutinių aukščių ISO 25178 ir paviršiaus šiurkštumo ISO 4287 standartus. Iš gautų matavimų rezultatų yra skaičiuojami vidutinių aukščių ir paviršiaus šiurkštumo vidurkiai (3.1 lentelė). Išmatuotos vidutinio aritmetinio aukščio S_a reikšmės vyrauja nuo 0,122 μm iki 0,294 μm , vidutinio kvadratinio aukščio S_q – nuo 0,167 μm iki 0,4196 μm , tarp skirtingų eksperimentų.

3.1 lentelė. Vidutiniai aritmetiniai ir kvadratiniai aukščiai

Eksperimento Nr.	V_c, m/min	f_z, μm	a_p, μm	S_a, μm	S_q, μm
1	50	1	30	0,122	0,1672
2	50	1,5	60	0,155	0,206
3	50	2	90	0,178	0,232
4	100	1	60	0,156	0,222
5	100	1,5	90	0,155	0,210
6	100	2	30	0,155	0,204
7	150	1	90	0,294	0,419
8	150	1,5	30	0,155	0,225
9	150	2	60	0,132	0,171

Iš gautų rezultatų (3.1 lentelė) ir paviršiaus topografijų (3.1 pav.) matoma, kad paviršiaus kokybės geriausi rezultatai gauti atlikus eksperimentus Nr. 1 (mažiausias pjovimo greitis, mažiausia pastūma dančiui, pjovimo gylis) ir Nr. 9 (didžiausias pjovimo greitis ir pastūma dančiui, ir vidutinis pjovimo gylis). Nepageidaujami rezultatai gauti atlikus eksperimentą Nr. 7 (didžiausias pjovimo greitis, didžiausias pjovimo gylis, mažiausia pastūma dančiui).



3.1 pav. Išfrezuoto griovelio paviršiaus topografija pagal eksperimento numerį

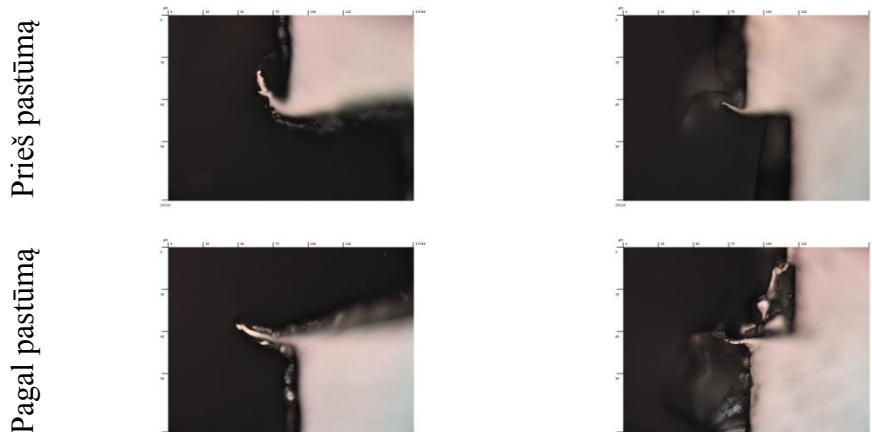
3.2. Užvartų įvertinimas

Užvartoms įvertinti buvo atliekami aukščio ir pločio matavimai. Po atliktų matavimų buvo skaičiuojami užvartų aukščio ir pločio vidurkiai, atsižvelgiant į apdirbimo būdą (3.2 lentelė). Išmatuotos užvartų aukščių vidurkių reikšmės frezuojant pagal pastūmą vyrauja nuo 16 μm iki 40 μm , frezuojant prieš pastūmą vyrauja nuo 18 μm iki 65 μm .

3.2 lentelė. Užvartų aukščio ir pločio rezultatų lentelė

Eksperimento Nr.	Aukštis		Plotis			
	Pagal pastūmą, mm	Prieš pastūmą, mm	Pagal pastūmą frezavimo pradžioje, mm	Pagal pastūmą frezavimo pabaigoje, mm	Prieš pastūmą frezavimo pradžioje, mm	Prieš pastūmą frezavimo pabaigoje, mm
1	0,016	0,020	0,088	0,072	0,051	0,062
2	0,020	0,059	0,124	0,136	0,079	0,082
3	0,016	0,029	0,157	0,135	0,135	0,120
4	0,016	0,018	0,089	0,094	0,072	0,079
5	0,026	0,028	0,149	0,132	0,143	0,146
6	0,023	0,038	0,048	0,083	0,047	0,043
7	0,029	0,043	0,123	0,140	0,174	0,228
8	0,039	0,065	0,063	0,082	0,082	0,058
9	0,040	0,043	0,106	0,121	0,133	0,165

Pateiktos užvartų aukščio nuotraukos darytos su Sensofar S neox, o užvartų matavimai atlikti ImageJ programine įranga. Iš rezultatų lentelės (3.2 lentelė) pastebima, kad esant pastoviam pjovimo greičiui $V_c = 50$ m/min ir didėjant danties pastūmai bei pjovimo gyliui užvartos aukštis (pagal pastūmą) vyrauja 16 – 20 μ m ribose, tačiau užvartų plotis (pagal ir prieš pastūmą) padidėja dvigubai.



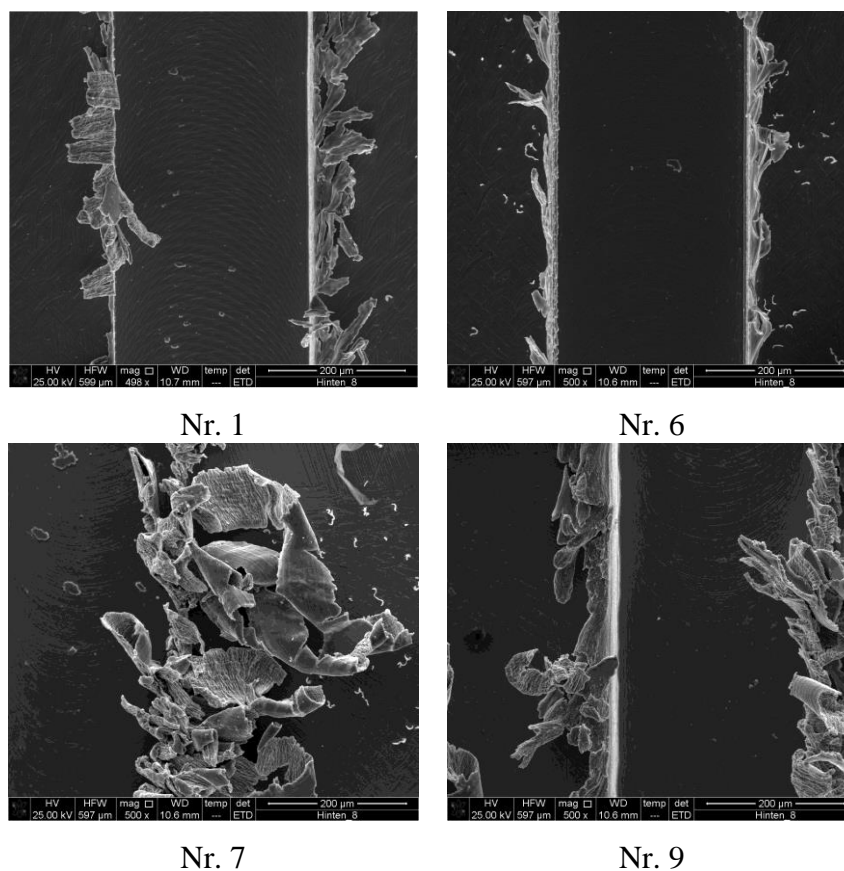
3.2 pav. Mažiausio užvartų aukščio nuotraukos darytos su Sensofar S neox

Mažiausias užvartų aukštis susiformuoja atlikus eksperimentus Nr. 1 (3.2 pav. kairėje) ir Nr. 4 (3.2 pav. dešinėje), o didžiausias užvartos susiformuoja atlikus eksperimentus Nr. 8 (3.3 pav. kairėje) ir Nr. 9 (3.3 pav. dešinėje).



3.3 pav. Didžiausio užvartų aukščio nuotraukos darytos su *Sensofar S neox*

Iš rezultatų lentelės (3.2 lentelė) pastebima, kad pjovimo gylio padidėjimas ar sumažėjimas tiesiogiai veikia užvartų pločio (pagal ir prieš pastūmą) padidėjimą ir sumažėjimą. Išmatuotos užvartų pločio vidurkių reikšmės frezuojant pagal pastūmą vyrauja nuo 48 μm iki 157 μm , frezuojant prieš pastūmą vyrauja nuo 43 μm iki 228 μm . Pateiktose nuotraukose (3.4 pav.) matomi vizualiai geriausi ir blogiausi gauti matavimų rezultatai. Mažiausios susiformavusios užvartos eksperimentų Nr. 1 ir Nr. 6 (3.4 pav.), o didžiausios – eksperimentų Nr. 7 ir Nr. 9.

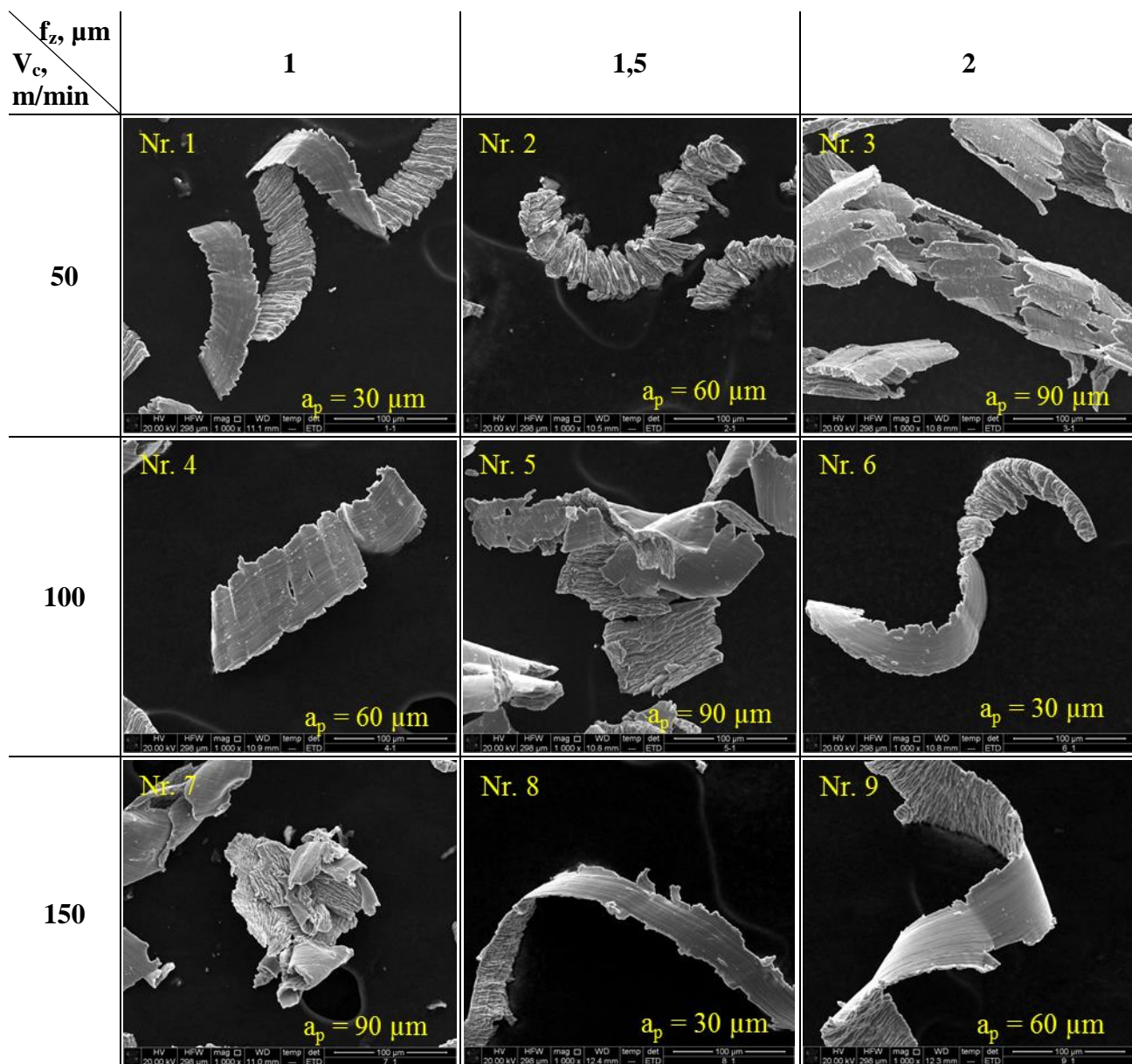


3.4 pav. Užvartų pločio nuotraukos darytos su SEM, padidininmas 500x

3.3. Drožlių įvertinimas

Surinktos drožlės buvo stebimos per skenuojantį elektroninį mikroskopą (SEM) (padidėjimas 1000x) ir pateikiamos 3.5 pav.

Drožlės yra sunku išmatuoti dėl įvairių ir sudėtingų formų, todėl atlikta tik vaizdinė analizė. Atlikus nuotraukų palyginimą pagal mastelį, pastebima, jog numeriais 3, 8, 9 (pagal eksperimento numerį) pažymėtose nuotraukose drožlės yra ilgesnės nei 200 μm , o likusiose nuotraukose trumpesnės nei 200 μm .



3.5 pav. Drožlių įvertinimas stebint per skenuojantį elektroninį mikroskopą (padidėjimas 1000x)

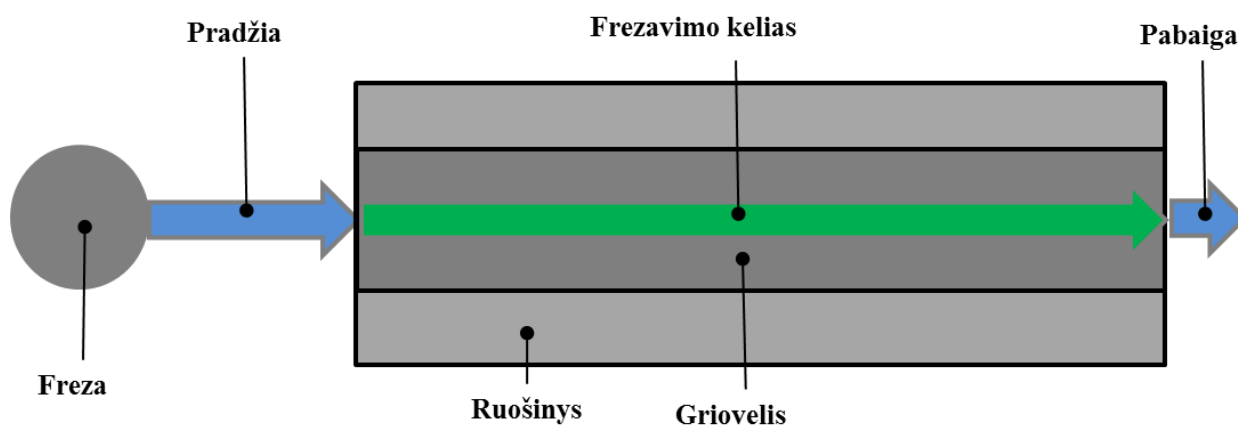
Atlikus eksperimentus pastebėta, kad frezuojant 90 μm gylyje susiformuoja susisukusios, susivirinusios ir įvairiausių formų drožlės (3.5 pav. Nr. 3, Nr. 5, Nr. 7) ir iš to galima spręsti, kad jos buvo dar kartą perpjaunamos, o tai sąlygoja greitesnį įrankio nusidėvėjimą. Dėl šios priežasties

tokio tipo drožlės nėra pageidaujamos ir jas būtina kontroliuoti apdirbimo proceso metu. Taip pat pastebimos ištisinės (3.5 pav. Nr. 8, Nr. 9) ir laužtinės (3.5 pav. Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4, Nr. 6) drožlės.

3.4. Apdirbimo laikas

Frezavimo laikui ir įrankio (frezos) nueitam keliui apskaičiuoti buvo naudota MasterCam programinė įranga, visi gauti rezultatai pateikti 9 lentelėje. Kiekvienam eksperimento numeriui (9 lentelė) naudota nauja freza.

Įrankio kelias (3.6 pav.) susideda iš pradžios, frezavimo ir pabaigos kelio. Frezavimo pradžios kelias tuščiaja eiga lygus 30 mm, frezavimo – 68 mm, pabaigos tuščiaja eiga – 7 mm. Tai sudaro 35% frezavimo laiko ir nueito kelio, kai nėra kontakto tarp frezos ir ruošinio.



3.6 pav. Frezos nueito kelio schema

Pirmojo eksperimento (3.3 lentelė, Nr. 1) metu, 3 griovelių frezavimo laikas yra 178,14 s, o devintojo eksperimento (3.3 lentelė, Nr. 9) frezavimo laikas yra 29,7 s ir kiekvienam eksperimentui naudotos naujos frezos nueitas kelias – 315 mm.

Panašius eksperimentus atliko Piquard su bendraautoriais [30], [35], kurie naudojo kotines frezas titano lydinio mikrofrezavimui beveik analogiškame pjovimo režimų diapazone. Šie autoriai su viena freza frezavo 4 griovelius bei tyrė frezų nudilimą ir nustatė, kad pjovimo gylio ilgyje ant įrankio paviršiaus pasitaikydavo priemaišų iš apdirbamos medžiagos, bet frezos nudilimas nenustatytas. Remiantis šiais rezultatais [30] ir baigiamajame darbe atliktų mikrofrezavimo eksperimentų trukme ir skaičiumi su vienu įrankiu, galima teigti, kad paviršiaus kokybinių rodiklių neįtakoją frezų nudilimas. Dėl to, galima teigti, kad 2-o eksperimento metu sulūžęs įrankis buvo atsitiktinis įvykis (pateikta priede 1).

3.3 lentelė. Apdirbimo laiko ir nueito kelio rezultatai

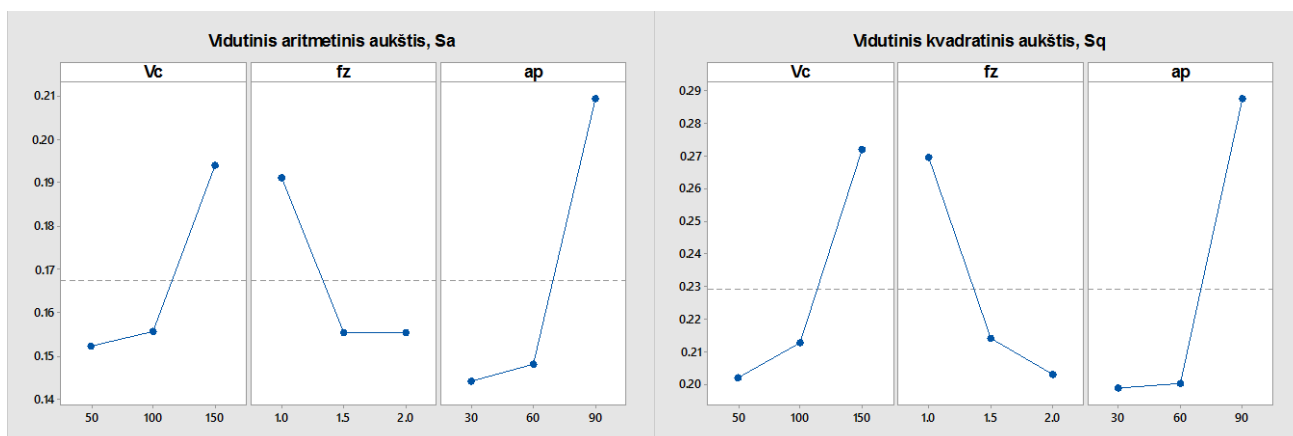
Eksperimento Nr.	Kartojimas	Apdirbimo laikas, s		Įrankio kelias, mm	
		Griovelio laikas	Suma	Griovelio kelias	Suma
1	1	59,38	178,14	105	315
	2	59,38		105	
	3	59,38		105	
2	1	39,59	118,77	105	315
	2	39,59		105	
	3	39,59		105	
3	1	29,69	89,07	105	315
	2	29,69		105	
	3	29,69		105	
4	1	29,69	89,07	105	315
	2	29,69		105	
	3	29,69		105	
5	1	19,79	59,37	105	315
	2	19,79		105	
	3	19,79		105	
6	1	14,84	44,52	105	315
	2	14,84		105	
	3	14,84		105	
7	1	19,79	59,37	105	315
	2	19,79		105	
	3	19,79		105	
8	1	13,2	39,6	105	315
	2	13,2		105	
	3	13,2		105	
9	1	9,9	29,7	105	315
	2	9,9		105	
	3	9,9		105	

Pastaba: kiekvienam eksperimentui naudotas naujas įrankis – iš viso 9-ios $\varnothing 0,3$ mm frezos.

4. Statistinė analizė

Statistinė analizė atlikta naudojantis Taguchi metodu (naudojant ortogonalius masyvus), siekiant įvertinti, ar ryšys tarp gautų rezultatų ir kiekvieno nario modelyje yra statistiškai reikšmingi. Pagrindė buvo patikrinta P-reikšmė (pasikliovimo lygmuo), siekiant įrodyti arba paneigti įvesties kintamųjų poveikį atsako rezultatams. P-reikšmė yra tikimybė, kuri yra lyginama su nulinė hipoteze. Mažesnės tikimybės pateikia tvirtesnius įrodymus prieš nulinę hipotezę. P-reikšmė buvo patikrinta su reikšmingumo lygiu 0,05. Reikšmingumo lygis 0,05 nurodo 5% riziką.

4.1 pav. pateiktas pjovimo režimų pagrindinis poveikis paviršiaus šiurkštumo parametrams S_a ir S_q .

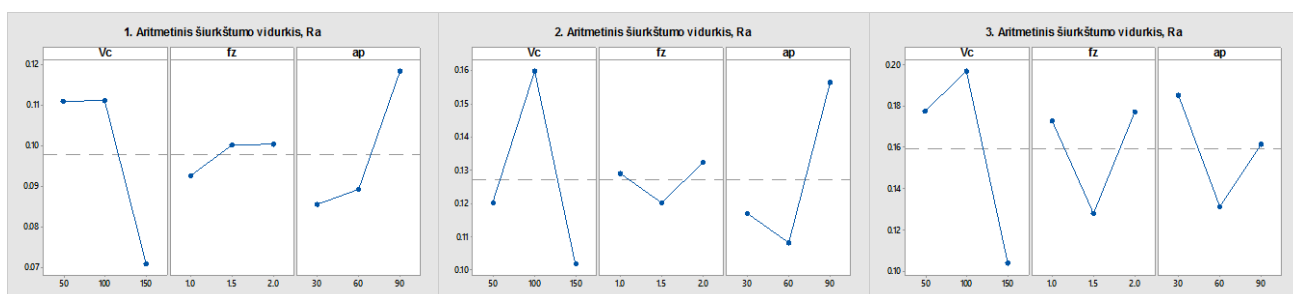


4.1 pav. Pjovimo režimų poveikio vidutinio aukščio S_a , S_q grafikai

Iš pateiktų statistinių rezultatų (2 ir 3 priedai) matoma, kad pateikti pjovimo režimų – V_c , f_z ir a_p diapazonai nėra statistiškai reikšmingi vidutiniams aritmetiniams S_a ir kvadratiniais S_q aukščiams. Nepaisant to, atsižvelgiant į rezultatų rangus (angl. rank) iš atsako lentelės (2 ir 3 priedai. Response Table for Means), galima daryti išvadą, kad pagrindinį poveikį paviršiaus S_a ir S_q parametrų daro pjovimo gylis a_p ir jo padidėjimas ar sumažėjimas gali daryti įtaką S_a ir S_q rezultatams.

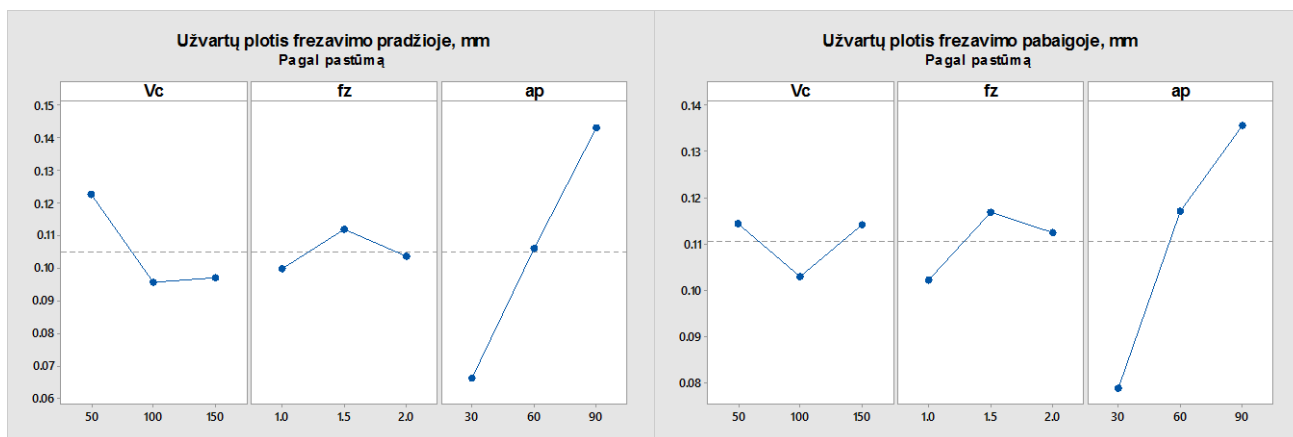
Lyginant pjovimo režimų daromą poveikį paviršiaus šiurkštumui (R_a), parametras buvo vertinamas griovelio frezavimo pradžios, vidurio ir pabaigos padėtyse.

4.2 pav. pateiktas pjovimo režimų poveikis paviršiaus šiurkštumui R_a .



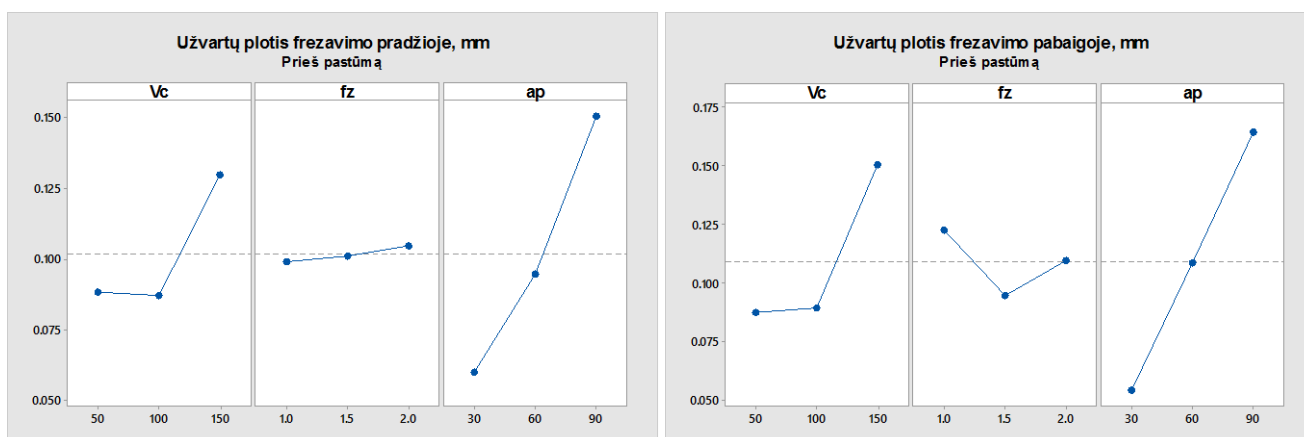
4.2 pav. Pjovimo režimų poveikio paviršiaus šiurkštumui R_a grafikai

Iš pateiktų statistinių rezultatų (4 priedas) matoma, kad pateikti pjovimo režimų – V_c , f_z ir a_p diapazonai nėra statistiškai reikšmingi paviršiaus šiurkštumui R_a . Pjovimo greitis griovelio pabaigoje daro didžiausią poveikį R_a parametrai, tačiau pateiktame diapazone nėra statistiškai reikšmingi. Nepaisant to, atsižvelgiant į rezultatų rangus (angl. rank) iš atsako lentelės (4 priedas. Responce Table for Means) galima daryti išvadą, kad pagrindinis parametras yra pjovimo greitis V_c ir jo padidėjimas ar sumažėjimas (neatsižvelgiant į pateiktą diapazoną) gali daryti įtaką R_a rezultatui.



4.3 pav. Pjovimo režimų poveikio užvartų pločiui (pagal pastumą) grafikai

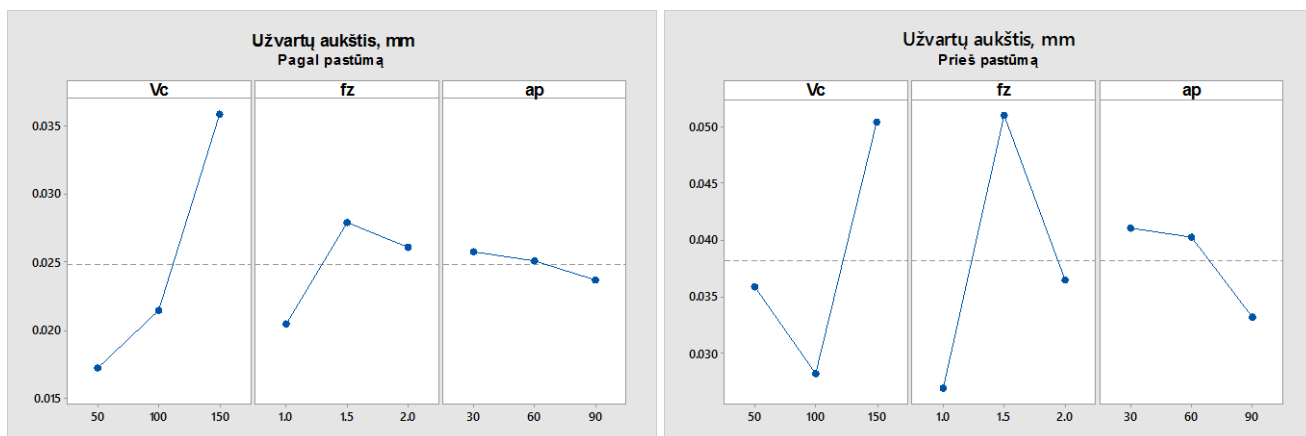
Iš pateiktų statistinių rezultatų (5 priedas) ir grafiko (4.3 pav.) matoma, kad pjovimo režimų – V_c , f_z ir a_p diapazono, pjovimo gylis a_p yra statistiškai reikšmingas užvartų pločiui griovelio pradžioje ir pabaigoje frezuojant pagal pastumą. Atsižvelgiant į gautą atsako lentelę (5 priedas. Responce Table for Means) ir joje pateiktą rangą (angl. rank), matoma, kad pagrindinį poveikį užvartų pločio susiformavimui daro pjovimo gylis a_p , pjovimo greitis V_c ir tada seka pastūma dančiui f_z .



4.4 pav. Pjovimo režimų poveikio užvartų pločiui (prieš pastumą) grafikai

Iš pateiktų statistinių rezultatų (6 priedas) matoma, kad iš pateiktų pjovimo režimų – V_c , f_z ir a_p diapazonų, pjovimo gylis a_p yra statistiškai reikšmingas užvartų pločiui griovelio pradžioje frezuojant prieš pastumą.

4.5 pav. pavaizduotas pjovimo režimų poveikis užvartų aukščiui pagal ir prieš pastumą.

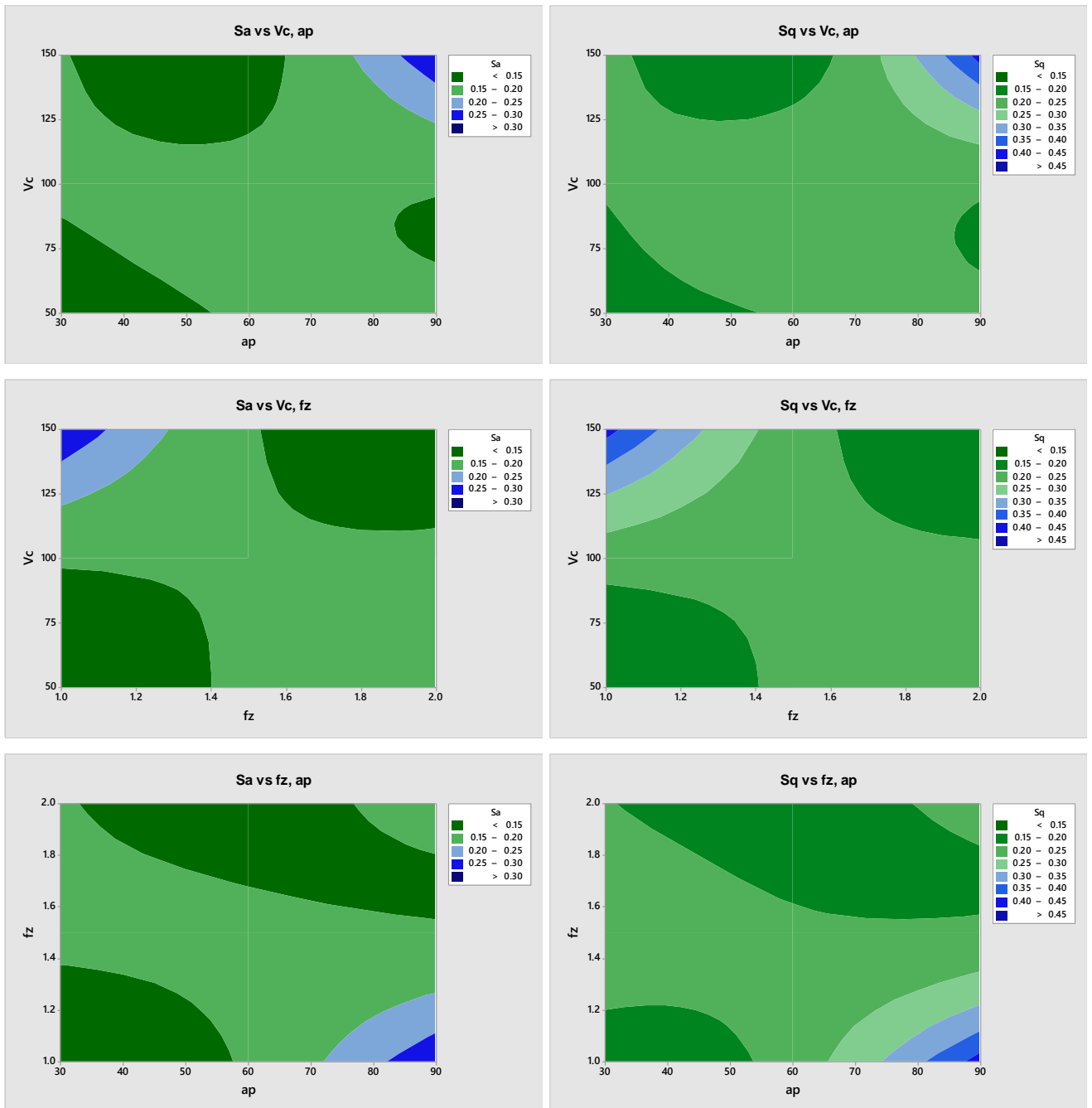


4.5 pav. Pjovimo režimų poveikio užvartų aukščiui grafikai

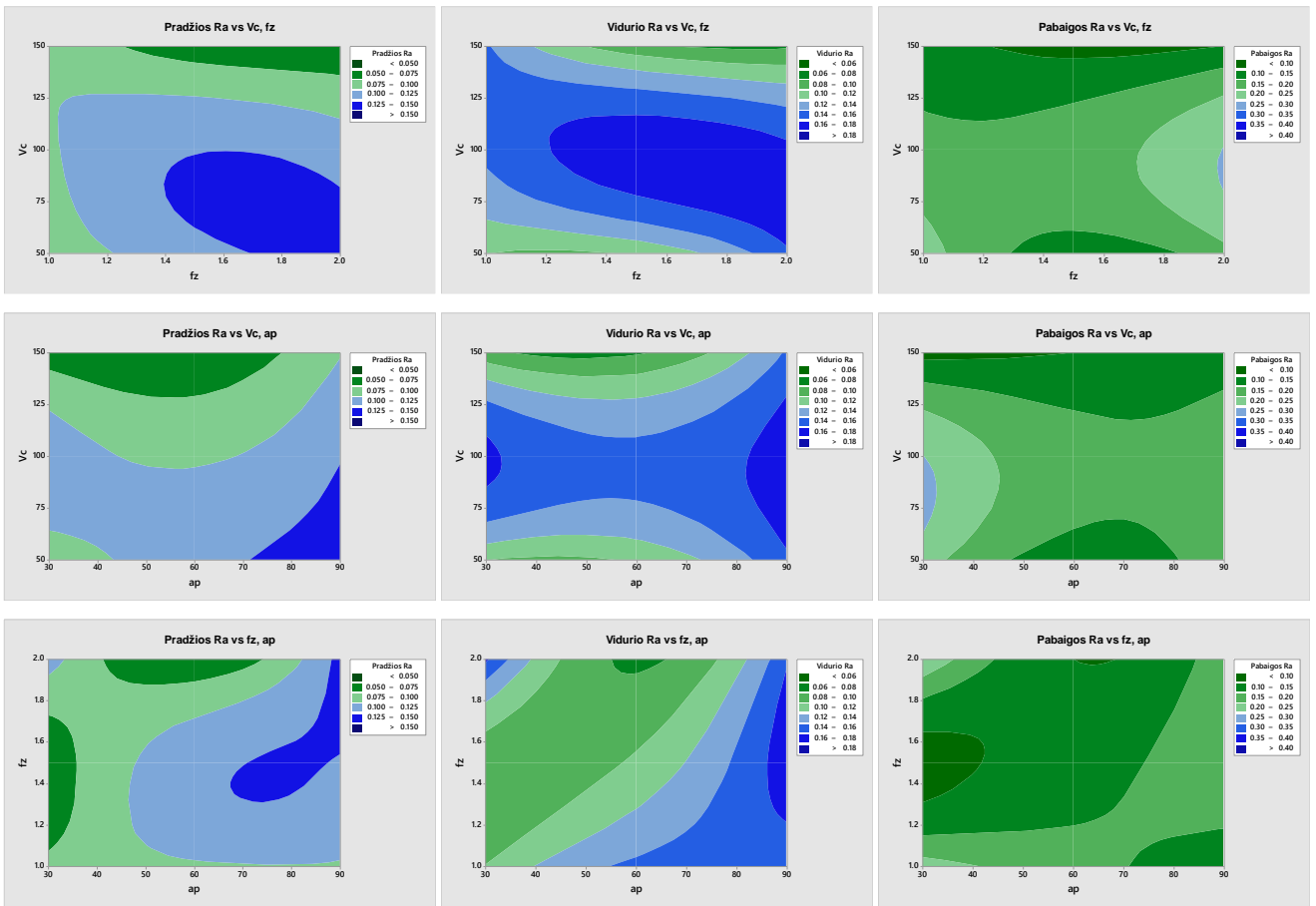
Iš pateiktų statistinių rezultatų (7 ir 8 priedai) ir grafiko (4.5 pav.) matoma, kad pjovimo režimų – V_c , f_z ir a_p diapazono, pjovimo greitis V_c yra statistiškai reikšmingas užvartų aukščiui frezuojant pagal pastumą, o frezuojant prieš pastumą pjovimų režimų diapazonas nėra statistiškai reikšmingas. Nepaisant to, atsižvelgiant į rezultatų eilę (angl. rank), gautą iš atsako lentelės (7 ir 8 priedai. Responce Table for Means), galima daryti išvadą, kad pagrindinis parametras yra pastūma dančiui f_z ir f_z padidėjimas ar sumažėjimas (neatsižvelgiant į pateiktą diapazoną) gali turėti įtakos užvartų aukščiui, frezuojant prieš pastumą.

Kontūrinis grafikas yra grafinis trimatis paviršiaus vaizdavimo būdas dvimačiu formatu, kuriame braižomi pastovūs z pjūviai, vadinami kontūrais. Kontūriniai grafikai yra naudingi nustatant pageidaujamas atsako vertes ir veikimo sąlygas.

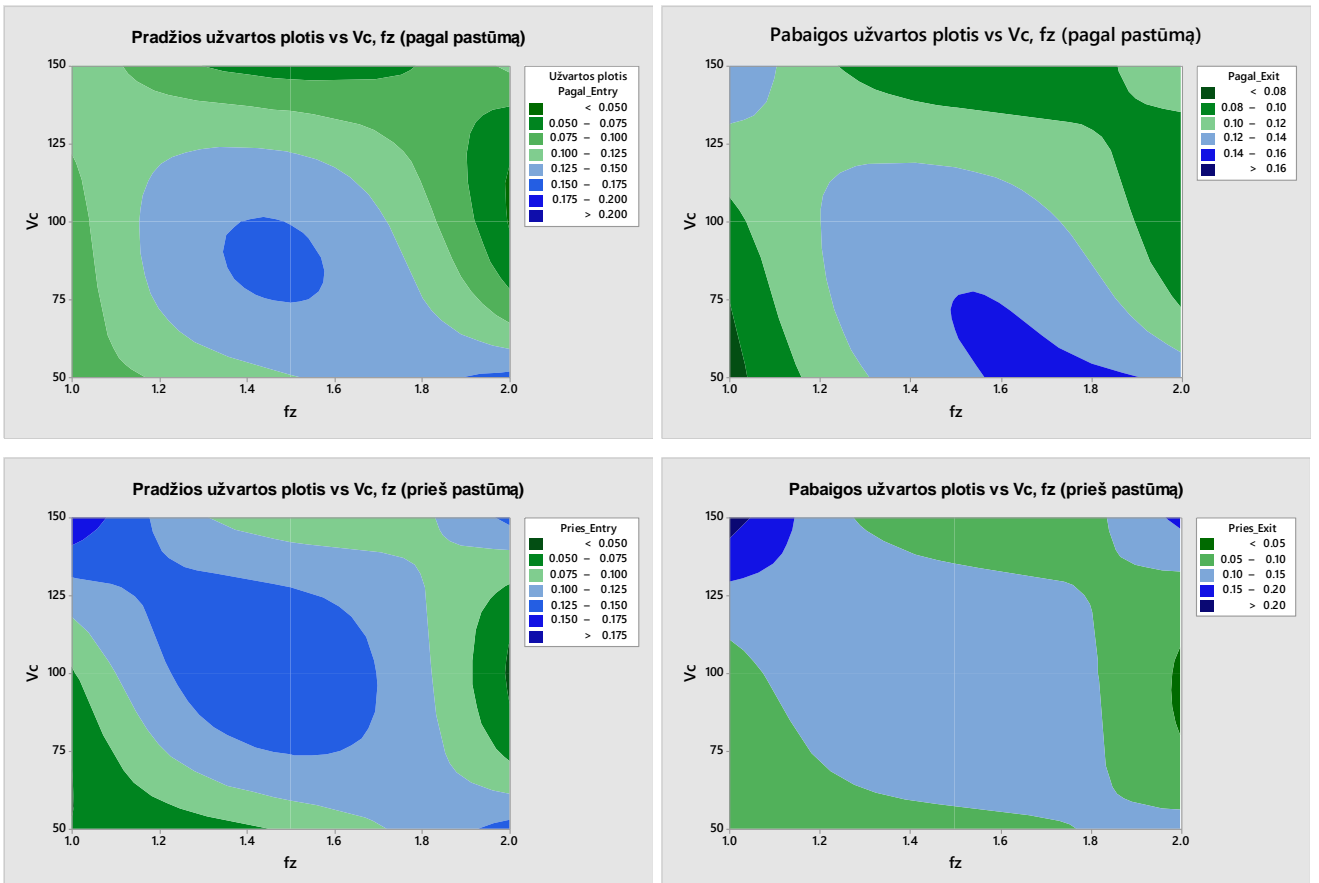
Paveiksluose (4.6 pav. - 4.9 pav.) pateikti kontūriniai grafikai, iš kurių galima numanyti koks bus gaunamas rezultatas pasirinkus tam tikrus pjovimo režimus, kur žaliuose kontūruose tikimasi gauti geriausius rezultatus, o mėlynuose – blogiausius.

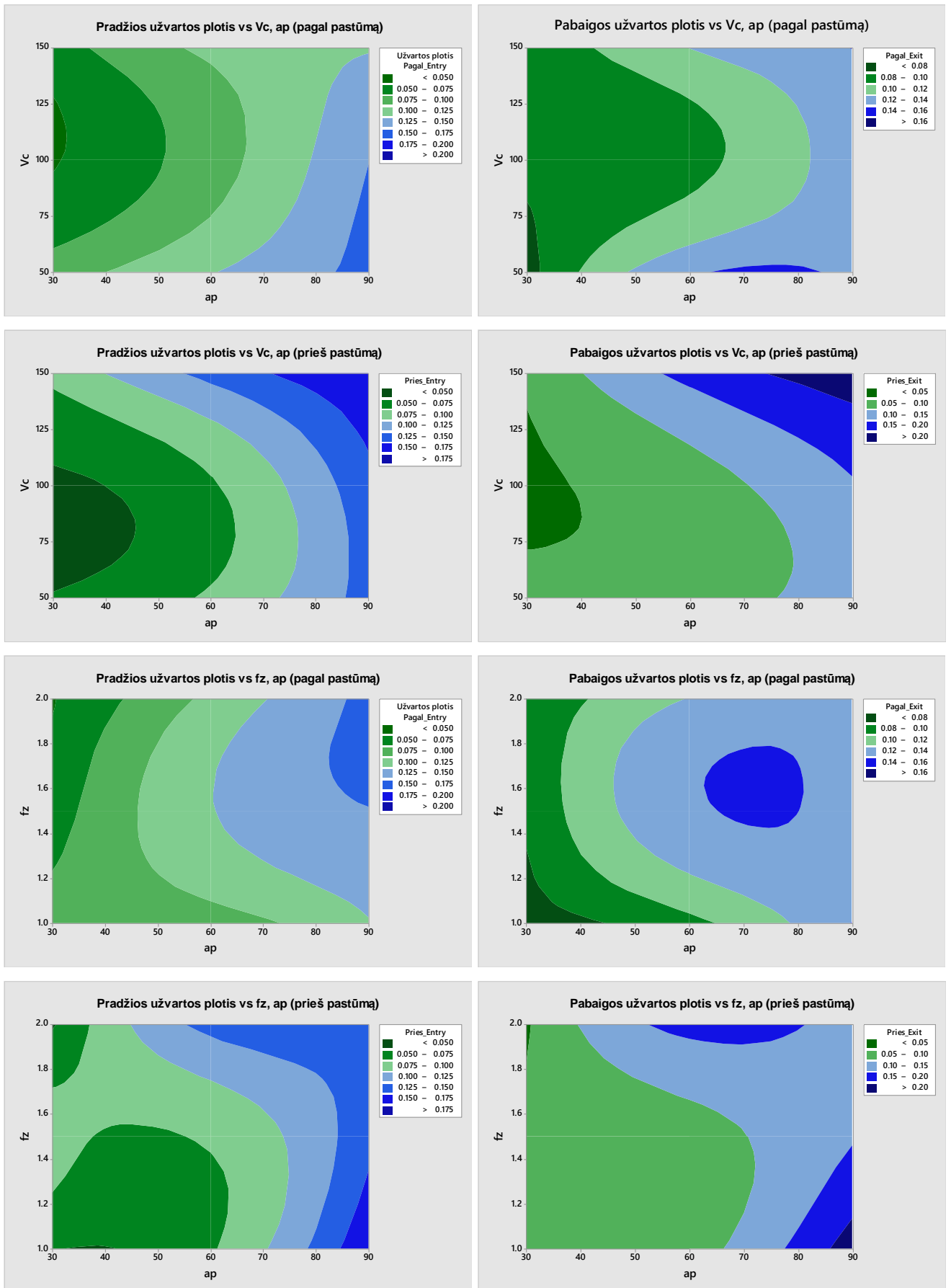


4.6 pav. Vidutinio aritmetinio (S_a) ir kvadratinio (S_q) aukščio kontūrų grafikas

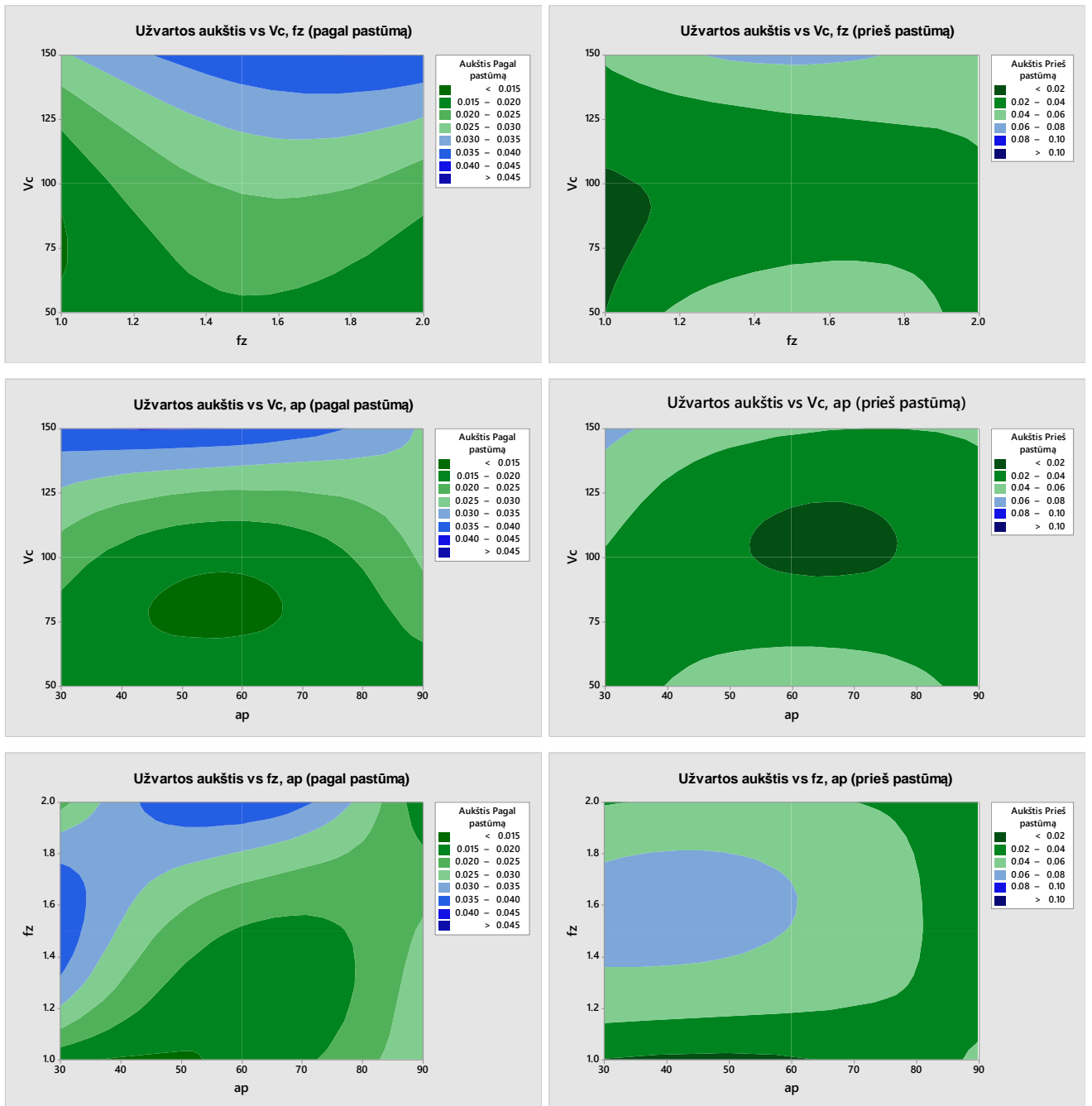


4.7 pav. Paviršiaus šiurkštumo (R_a) kontūrų grafikas





4.8 pav. Užvartų pločio kontūrų grafikas



4.9 pav. Užvartų aukščio kontūrų grafikas

Išvados ir pasiūlymai

Atlikus literatūros apžvalgą, apžvelgtos didžiausios ištinkančios problemos mikrofrezuojant titaną ir jo lydinius, taip pat apžvelgtas drožlių ir užvartų susiformavimo proceso mechanizmas. Matyti, kad apdirbant titaną ir jo lydinius mikrofrezavimu didžiausia problema yra užvartų susiformavimas.

Atliktas titano (II) mikrofrezavimo tyrimas tiriant pjovimo greičio V_c (50 – 150 m/min), pastūmos dančiui f_z (1 – 2 μm) ir pjovimo gylio a_p (30 – 90 μm) įtaką apdirbamam paviršiui ir užvartų susidarymui. Tyrimas atliktas panaudojant Taguchi eksperimentų projektavimo metodą (3-ių faktorių, 3-ių lygių), siekiant nustatyti pjovimo režimų parametrų poveikį apdirbimo kokybei.

Titano (II) mikrofrezavimo tyrimas atliktas su *Kugler[®] Micromaster 5X* mikro-frezavimo staklėmis naudojant kotines $\varnothing 0,3\text{mm}$ frezas su AlTiN danga.

Atlikus matavimus skenuojančiu elektroniniu mikroskopu gauta, kad vidutinio aritmetinio aukščio S_a reikšmės vyrauja nuo 0,122 μm iki 0,294 μm , vidutinio kvadratinio aukščio S_q – nuo 0,167 μm iki 0,4196 μm . Išmatuotos užvartų aukščių vidurkių reikšmės frezuojant pagal pastūmą vyrauja nuo 16 μm iki 40 μm , frezuojant prieš pastūmą vyrauja nuo 18 μm iki 65 μm . Išmatuotos užvartų pločio vidurkių reikšmės frezuojant pagal pastūmą vyrauja nuo 48 μm iki 157 μm , frezuojant prieš pastūmą vyrauja nuo 43 μm iki 228 μm . Ko pasekoje, galima daryti išvadą, kad užvartų formavimosi atžvilgiu palankiau titaną (II) mikrofrezuojant apdirbti pagal pastūmą.

Siekiant nustatyti, ar pjovimo režimų parametrų įtaka paviršiaus kokybei po apdirbimo nebuvo atsitiktinė, ir kokie parametrai įtakoja apdirbto paviršiaus kokybinius rodiklius, buvo atlikta statistinė analizė.

Atlikus statistinę analizę, gauta, kad atliktų eksperimentų diapazone pagal pjovimo režimus, tik pjovimo gylis a_p yra statistiškai reikšmingas užvartų pločiui (frezuojant pagal ir prieš pastūmą). Analogiškai nustatyta, kad pjovimo greitis V_c yra statistiškai reikšmingas užvartų aukščiui (frezuojant pagal pastūmą), kiti pjovimo režimai nėra statistiškai reikšmingi.

Atsižvelgiant į atliktų eksperimentų diapazoną ir statistinės analizės faktorių rangų eiliškumą, daroma išvada, kad paviršiaus šiurkštumo parametrams - vidutiniam aritmetiniam S_a ir kvadratiniam S_q aukščio susiformavimui didžiausią poveikį daro pjovimo gylis a_p , o mažiausią - pastūma dančiui f_z . Atitinkamai paviršiaus šiurkštumui R_a – didžiausias poveikis pjovimo greičio V_c ir mažiausias pastūmos dančiui f_z . Užvartų pločiui (pagal ir prieš pastūmą) – didžiausias poveikis pjovimo gylio a_p ir mažiausias – pastūmos dančiui f_z . Užvartų aukščiui (frezuojant pagal pastūmą) – didžiausias poveikis pjovimo greičio V_c , o mažiausias - pjovimo gylio a_p . O užvartų aukščiui (frezuojant prieš pastūmą) – didžiausias poveikis yra pastūmos dančiui f_z , o mažiausias – pjovimo gylio a_p .

Geriausia paviršiaus kokybė gauta atlikus eksperimentą Nr. 1, kur pjovimo režimai: $V_c - 50$ m/min, $f_z - 1$ μm , $a_p - 30$ μm ir gauti rezultatai pateikti žemiau:

Vidutinis aukštis:

$$S_a - 0,122 \mu\text{m};$$

$$S_q - 0,167 \mu\text{m}.$$

Užvartų aukštis:

$$\text{pagal pastūmą} - 16 \mu\text{m};$$

$$\text{prieš pastūmą} - 20 \mu\text{m}.$$

Užvartų plotis:

$$\text{pagal pastūmą} - 80 \mu\text{m};$$

$$\text{prieš pastūmą} - 56 \mu\text{m}.$$

Literatūros šaltinių sąrašas

- [1] ŠEŠOK, Andžela. Medžiagos medicinoje. Vilnius: Technika, 2012 [žiūrėta 2017-10-02]. Prieiga per: http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/1430/1/1380-S_Sesok_Medziagos_WEB.pdf
- [2] S. I. Jaffery ir P. T. Mativenga, „Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 40, nr. 7–8, p. 687–696, vas. 2009.
- [3] R. B. Osman ir M. V. Swain, „A Critical Review of Dental Implant Materials with an Emphasis on Titanium versus Zirconia“, *Materials*, t. 8, nr. 3, p. 932–958, kovo 2015.
- [4] A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, F. Bucciotti, ir L. Facchini, „Comparison between Wrought and EBM Ti6Al4V Machinability Characteristics“, *Key Eng. Mater.*, t. 611–612, p. 1186–1193, 2014.
- [5] T. Özel, T. Thepsonthi, D. Ulutan, ir B. Kaftanoğlu, „Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools“, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, t. 60, nr. 1, p. 85–88, 2011.
- [6] T. Thepsonthi ir T. Özel, „Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear“, *J. Mater. Process. Technol.*, t. 213, nr. 4, p. 532–542, balandžio 2013.
- [7] C. us P. +4631 710 32 00 F. +4631 710 32 01 S. contact form, „EBM-Built Materials“, *Arcam AB*.
- [8] T. Thepsonthi ir T. Özel, „Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 63, nr. 9–12, p. 903–914, gruodž. 2012.
- [9] T. Masuzawa, „State of the Art of Micromachining“, *CIRP Ann.*, t. 49, nr. 2, p. 473–488, saus. 2000.
- [10] M. A. Câmara, J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, ir J. P. Davim, „State of the Art on Micromilling of Materials, a Review“, *J. Mater. Sci. Technol.*, t. 28, nr. 8, p. 673–685, rugpjūčio 2012.
- [11] E. Kuram ir B. Ozelik, „Optimization of machining parameters during micro-milling of Ti6Al4V titanium alloy and Inconel 718 materials using Taguchi method“, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, t. 231, nr. 2, p. 228–242, sausio 2017.
- [12] S. Jahanmir, „Surface Integrity in Ultrahigh Speed Micromachining“, *Procedia Eng.*, t. 19, nr. Supplement C, p. 156–161, saus. 2011.
- [13] M. Armendia, A. Garay, L.-M. Iriarte, ir P.-J. Arrazola, „Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC-Co tools“, *J. Mater. Process. Technol.*, t. 210, nr. 2, p. 197–203, saus. 2010.
- [14] R. Bejjani, M. Balazinski, H. Attia, P. Plamondon, ir G. L'Espérance, „Chip formation and microstructure evolution in the adiabatic shear band when machining titanium metal matrix composites“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 109, p. 137–146, spal. 2016.
- [15] A. Davoudinejad, E. Chiappini, S. Tirelli, M. Annoni, ir M. Strano, „Finite Element Simulation and Validation of Chip Formation and Cutting Forces in Dry and Cryogenic Cutting of Ti-6Al-4V“, *Procedia Manuf.*, t. 1, nr. Supplement C, p. 728–739, saus. 2015.
- [16] N. T. S. V2, „Pembentukan Beram (Chips Formation) pada Proses Pemesinan“, *tugas sekolah kejuruan*.
- [17] T. Thepsonthi ir T. Özel, „Simulation of serrated chip formation in micro-milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using 2D elasto-viscoplastic finite element modeling“, *Prod. Eng.*, t. 10, nr. 6, p. 575–586, gruodž. 2016.
- [18] H. Wang, S. To, C. Y. Chan, C. F. Cheung, ir W. B. Lee, „Elastic strain induced shear bands in the microcutting process“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 50, nr. 1, p. 9–18, saus. 2010.
- [19] A. E. Bayoumi ir J. Q. Xie, „Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt.%Al-4wt.%V alloy“, *Mater. Sci. Eng. A*, t. 190, nr. 1, p. 173–180, saus. 1995.
- [20] S. Sun, M. Brandt, ir J. Mo, *Effect of Microstructure on Cutting Force and Chip Formation during Machining of Ti-6Al-4V Alloy*, t. 690–693. 2013.

- [21] J. Barry, G. Byrne, ir D. Lennon, „Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti–6Al–4V alloy“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 41, nr. 7, p. 1055–1070, geg. 2001.
- [22] J. C. Aurich, D. Dornfeld, P. J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, ir S. Min, „Burrs—Analysis, control and removal“, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, t. 58, nr. 2, p. 519–542, 2009.
- [23] „ISO 13715:2000(en), Technical drawings — Edges of undefined shape — Vocabulary and indications“. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13715:ed-2:v1:en>. [Žiūrėta: 19-lapkr-2017].
- [24] A. J. Mian, N. Driver, ir P. T. Mativenga, „A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 50, nr. 1–4, p. 163–174, rugs. 2010.
- [25] S. Filiz, C. M. Conley, M. B. Wasserman, ir O. B. Ozdoganlar, „An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 47, nr. 7, p. 1088–1100, birž. 2007.
- [26] G. Bissacco, H. N. Hansen, ir L. De Chiffre, „Micromilling of hardened tool steel for mould making applications“, *J. Mater. Process. Technol.*, t. 167, nr. 2, p. 201–207, rugpj. 2005.
- [27] Z. Kou, Y. Wan, Y. Cai, X. Liang, ir Z. Liu, „Burr Controlling in Micro Milling with Supporting Material Method“, *Procedia Manuf.*, t. 1, p. 501–511, 2015.
- [28] A. Aramcharoen ir P. T. Mativenga, „Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel“, *Precis. Eng.*, t. 33, nr. 4, p. 402–407, spal. 2009.
- [29] G. Kiswanto, D. L. Zariatin, ir T. J. Ko, „The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation“, *J. Manuf. Process.*, t. 16, nr. 4, p. 435–450, spal. 2014.
- [30] R. Piquard, A. D’Acunto, P. Laheurte, ir D. Dudzinski, „Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation“, *Precis. Eng.*, t. 38, nr. 2, p. 356–364, balandžio 2014.
- [31] K. Lee ir D. A. Dornfeld, „Micro-burr formation and minimization through process control“, *Precis. Eng.*, t. 29, nr. 2, p. 246–252, balandžio 2005.
- [32] R. Lekkala, V. Bajpai, R. K. Singh, ir S. S. Joshi, „Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling“, *Precis. Eng.*, t. 35, nr. 4, p. 625–637, spal. 2011.
- [33] Kugler GMBH, „Instruction manual translation“, 2010. [Interaktyvus]. Adresas: www.kugler-precision.com.
- [34] „Micro Square End Mills - KYOCERA Precision Tools“. [Interaktyvus]. Adresas: <http://www.kyoceraprecisiontools.com/micro/milling/square-end.html>. [Žiūrėta: 02-saus-2018].
- [35] G. Le Coz, M. Fischer, R. Piquard, A. D’Acunto, P. Laheurte, ir D. Dudzinski, „Micro Cutting of Ti-6Al-4V Parts Produced by SLM Process“, *Procedia CIRP*, t. 58, nr. Supplement C, p. 228–232, saus. 2017.

Priedai

1 priedas. Eksperimentų matavimo rezultatai

Eksperimen- tas		Įvesties kintamieji				Gauti kintamieji										
						Paviršiaus šiurkštumas, μm					Užvartų plotis, mm					
Nr.	Paka- rtoji mai	Vc m/min	fz $\mu\text{m}/\text{t}$	ap μm	S _a	S _q	R _a			Pagal pastumą		Prieš pastumą		Pagal pastumą	Prieš pastumą	
							Pradžios	Vidurio	Pabaigos	Pradžios	Pabaigos	Pradžios	Pabaigos			
1	1	50	1	30	0,131	0,183	0,064	0,108	0,120	0,115	0,092	0,059	0,068	0,017	0,022	
	2	50	1	30	0,125	0,176	0,106	0,100	0,154	0,076	0,065	0,044	0,054	0,015	0,016	
	3	50	1	30	0,111	0,143	0,080	0,095	0,398	0,072	0,061	0,051	0,064	0,017	0,022	
2	4	50	1,5	60	0,186	0,234	0,166	0,065	X	0,153	X	0,081	X	0,019	0,101	
	5	50	1,5	60	0,136	0,190	0,091	0,113	0,115	0,089	0,138	0,083	0,075	0,021	0,035	
	6	50	1,5	60	0,145	0,195	0,093	0,133	0,141	0,129	0,134	0,073	0,088	0,019	0,043	
3	7	50	2	90	0,175	0,226	0,116	0,167	0,187	0,160	0,133	0,152	0,147	0,016	0,031	
	8	50	2	90	0,183	0,237	0,159	0,152	0,183	0,162	0,149	0,128	0,142	0,017	0,026	
	9	50	2	90	0,178	0,235	0,124	0,150	0,174	0,148	0,123	0,123	0,071	0,015	0,028	
4	10	100	1	60	0,154	0,212	0,094	0,128	0,187	0,085	0,086	0,065	0,066	0,023	0,012	
	11	100	1	60	0,168	0,246	0,106	0,159	0,142	0,098	0,104	0,070	0,066	0,011	0,023	
	12	100	1	60	0,147	0,210	0,089	0,146	0,169	0,084	0,093	0,082	0,106	0,014	0,020	
5	13	100	1,5	90	0,170	0,226	0,112	0,179	0,151	0,137	0,121	0,162	0,170	0,028	0,026	
	14	100	1,5	90	0,135	0,208	0,142	0,161	0,197	0,097	0,137	0,161	0,156	0,028	0,034	
	15	100	1,5	90	0,160	0,198	0,117	0,174	0,175	0,214	0,138	0,106	0,111	0,021	0,024	
6	16	100	2	30	0,152	0,197	0,129	0,133	0,437	0,048	0,093	0,043	0,041	0,023	0,057	
	17	100	2	30	0,162	0,214	0,082	0,179	0,139	0,049	0,074	0,049	0,045	0,022	0,024	
	18	100	2	30	0,152	0,203	0,129	0,180	0,177	0,048	0,080	0,048	0,045	0,023	0,034	
7	19	150	1	90	0,238	0,346	0,096	0,134	0,130	0,110	0,097	0,150	0,243	0,043	0,039	
	20	150	1	90	0,342	0,464	0,114	0,129	0,128	0,117	0,167	0,173	0,198	0,020	0,039	
	21	150	1	90	0,304	0,449	0,085	0,164	0,131	0,143	0,156	0,199	0,242	0,025	0,051	
8	22	150	1,5	30	0,143	0,220	0,049	0,081	0,085	0,049	0,077	0,086	0,055	0,039	0,064	
	23	150	1,5	30	0,166	0,238	0,068	0,096	0,077	0,055	0,064	0,056	0,050	0,038	0,073	
	24	150	1,5	30	0,157	0,219	0,064	0,083	0,084	0,085	0,105	0,105	0,070	0,039	0,059	
9	25	150	2	60	0,132	0,167	0,056	0,096	0,098	0,076	0,086	0,074	0,141	0,049	0,039	
	26	150	2	60	0,125	0,159	0,045	0,056	0,101	0,110	0,173	0,138	0,182	0,043	0,048	
	27	150	2	60	0,140	0,189	0,063	0,080	0,101	0,131	0,102	0,188	0,173	0,027	0,042	

Pastaba: X reiškia, kad šio eksperimento metu nulūžo freza

2 priedas. Taguchi analizė: Vidutinio aritmetinio aukščio S_a

Linear Model Analysis: Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.16728	0.01895	8.826	0.013
Vc 50	-0.01506	0.02680	-0.562	0.631
Vc 100	-0.01173	0.02680	-0.438	0.704
fz 1.0	0.02379	0.02680	0.888	0.468
fz 1.5	-0.01198	0.02680	-0.447	0.699
ap 30	-0.02302	0.02680	-0.859	0.481
ap 60	-0.01917	0.02680	-0.715	0.549

S = 0.05686 R-Sq = 68.1% R-Sq(adj) = 0.0%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.003247	0.003247	0.001623	0.50	0.666
fz	2	0.002547	0.002547	0.001274	0.39	0.717
ap	2	0.008032	0.008032	0.004016	1.24	0.446
Residual Error	2	0.006465	0.006465	0.003233		
Total	8	0.020291				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.1522	0.1911	0.1443
2	0.1555	0.1553	0.1481
3	0.1941	0.1555	0.2095
Delta	0.0418	0.0358	0.0652
Rank	2	3	1

3 priedas. Taguchi analizė: Vidutinio kvadratinio aukščio S_q

Linear Model Analysis: Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.22899	0.02705	8.466	0.014
Vc 50	-0.02691	0.03825	-0.704	0.555
Vc 100	-0.01630	0.03825	-0.426	0.711
fz 1.0	0.04092	0.03825	1.070	0.397
fz 1.5	-0.01493	0.03825	-0.390	0.734
ap 30	-0.02994	0.03825	-0.783	0.516
ap 60	-0.02876	0.03825	-0.752	0.531

S = 0.08114 R-Sq = 70.7% R-Sq(adj) = 0.0%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.008571	0.008571	0.004286	0.65	0.606
fz	2	0.007719	0.007719	0.003860	0.59	0.630
ap	2	0.015508	0.015508	0.007754	1.18	0.459
Residual Error	2	0.013167	0.013167	0.006584		
Total	8	0.044966				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.2021	0.2699	0.1990
2	0.2127	0.2141	0.2002
3	0.2722	0.2030	0.2877
Delta	0.0701	0.0669	0.0886
Rank	2	3	1

4 priedas. Taguchi analizė: Paviršiaus šiurkštumo R_a

Linear Model Analysis: R_a _Entry Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.097721	0.006444	15.165	0.004
Vc 50	0.013272	0.009113	1.456	0.283
Vc 100	0.013501	0.009113	1.482	0.277
fz 1.0	-0.005080	0.009113	-0.557	0.633
fz 1.5	0.002442	0.009113	0.268	0.814
ap 30	-0.012199	0.009113	-1.339	0.313
ap 60	-0.008417	0.009113	-0.924	0.453

S = 0.01933 R-Sq = 87.6% R-Sq(adj) = 50.4%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.003226	0.003226	0.001613	4.32	0.188
fz	2	0.000116	0.000116	0.000058	0.16	0.865
ap	2	0.001934	0.001934	0.000967	2.59	0.279
Residual Error	2	0.000747	0.000747	0.000374		
Total	8	0.006023				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.11099	0.09264	0.08552
2	0.11122	0.10016	0.08930
3	0.07095	0.10036	0.11834
Delta	0.04027	0.00772	0.03281
Rank	1	3	2

Linear Model Analysis: R_a _Middle Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.127364	0.005900	21.586	0.002
Vc 50	-0.007138	0.008344	-0.855	0.482
Vc 100	0.032514	0.008344	3.897	0.060
fz 1.0	0.001769	0.008344	0.212	0.852
fz 1.5	-0.006986	0.008344	-0.837	0.491
ap 30	-0.010216	0.008344	-1.224	0.345
ap 60	-0.019049	0.008344	-2.283	0.150

S = 0.01770 R-Sq = 93.8% R-Sq(adj) = 75.2%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.005256	0.005256	0.002628	8.39	0.107
fz	2	0.000237	0.000237	0.000119	0.38	0.725
ap	2	0.003971	0.003971	0.001986	6.34	0.136
Residual Error	2	0.000627	0.000627	0.000313		
Total	8	0.010091				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.1202	0.1291	0.1171
2	0.1599	0.1204	0.1083
3	0.1020	0.1326	0.1566
Delta	0.0579	0.0122	0.0483
Rank	1	3	2

Linear Model Analysis: Ra_Exit Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.15961	0.008289	19.256	0.003
Vc 50	0.01817	0.011722	1.550	0.261
Vc 100	0.03747	0.011722	3.196	0.086
fz 1.0	0.01364	0.011722	1.164	0.365
fz 1.5	-0.03157	0.011722	-2.693	0.115
ap 30	0.02606	0.011722	2.223	0.156
ap 60	-0.02814	0.011722	-2.401	0.138

S = 0.02487 R-Sq = 95.0% R-Sq(adj) = 79.9%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.014487	0.014487	0.007243	11.71	0.079
fz	2	0.004513	0.004513	0.002257	3.65	0.215
ap	2	0.004426	0.004426	0.002213	3.58	0.218
Residual Error	2	0.001237	0.001237	0.000618		
Total	8	0.024663				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.1778	0.1732	0.1857
2	0.1971	0.1280	0.1315
3	0.1040	0.1775	0.1617
Delta	0.0931	0.0495	0.0542
Rank	1	3	2

5 priedas. Taguchi analizē: Užvartų pločio pagal pastūmą

Linear Model Analysis: Plotis pagal pastūmą_Entry Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.105181	0.004720	22.284	0.002
Vc 50	0.017453	0.006675	2.615	0.120
Vc 100	-0.009554	0.006675	-1.431	0.289
fz 1.0	-0.005254	0.006675	-0.787	0.514
fz 1.5	0.006860	0.006675	1.028	0.412
ap 30	-0.038863	0.006675	-5.822	0.028
ap 60	0.000949	0.006675	0.142	0.900

S = 0.01416 R-Sq = 96.3% R-Sq(adj) = 85.2%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.001375	0.001375	0.000687	3.43	0.226
fz	2	0.000232	0.000232	0.000116	0.58	0.634
ap	2	0.008846	0.008846	0.004423	22.06	0.043
Residual Error	2	0.000401	0.000401	0.000201		
Total	8	0.010854				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.12263	0.09993	0.06632
2	0.09563	0.11204	0.10613
3	0.09728	0.10357	0.14310
Delta	0.02701	0.01211	0.07678
Rank	2	3	1

Linear Model Analysis: pagal pastūmą_Exit Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.110554	0.004786	23.101	0.002
Vc 50	0.003926	0.006768	0.580	0.621
Vc 100	-0.007612	0.006768	-1.125	0.378
fz 1.0	-0.008327	0.006768	-1.230	0.344
fz 1.5	0.006284	0.006768	0.928	0.451
ap 30	-0.031638	0.006768	-4.675	0.043
ap 60	0.006535	0.006768	0.966	0.436

S = 0.01436 R-Sq = 93.2% R-Sq(adj) = 72.7%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.000261	0.000261	0.000130	0.63	0.612
fz	2	0.000339	0.000339	0.000169	0.82	0.549
ap	2	0.005021	0.005021	0.002511	12.18	0.076
Residual Error	2	0.000412	0.000412	0.000206		
Total	8	0.006033				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1			
2			
3			
Delta			
Rank			

1	0.11448	0.10223	0.07892
2	0.10294	0.11684	0.11709
3	0.11424	0.11260	0.13566
Delta	0.01154	0.01461	0.05674
Rank	3	2	1

6 priedas. Taguchi analizē: Užvartų pločio prieš pastūmą

Linear Model Analysis: Plotis prieš pastūmą_Entry Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.101793	0.003792	26.846	0.001
Vc 50	-0.013501	0.005362	-2.518	0.128
Vc 100	-0.014530	0.005362	-2.710	0.113
fz 1.0	-0.002661	0.005362	-0.496	0.669
fz 1.5	-0.000414	0.005362	-0.077	0.946
ap 30	-0.041807	0.005362	-7.797	0.016
ap 60	-0.006923	0.005362	-1.291	0.326

S = 0.01138 R-Sq = 98.4% R-Sq(adj) = 93.7%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.003537	0.003537	0.001769	13.67	0.068
fz	2	0.000050	0.000050	0.000025	0.19	0.838
ap	2	0.012511	0.012511	0.006256	48.35	0.020
Residual Error	2	0.000259	0.000259	0.000129		
Total	8	0.016358				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.08829	0.09913	0.05999
2	0.08726	0.10138	0.09487
3	0.12982	0.10487	0.15052
Delta	0.04256	0.00574	0.09054
Rank	2	3	1

Linear Model Analysis: Plotis prieš pastūmą_Exit Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.109231	0.01191	9.173	0.012
Vc 50	-0.021362	0.01684	-1.268	0.332
Vc 100	-0.019806	0.01684	-1.176	0.361
fz 1.0	0.013719	0.01684	0.815	0.501
fz 1.5	-0.014110	0.01684	-0.838	0.490
ap 30	-0.054754	0.01684	-3.251	0.083
ap 60	-0.000415	0.01684	-0.025	0.983

S = 0.03572 R-Sq = 91.3% R-Sq(adj) = 65.4%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.007630	0.007630	0.003815	2.99	0.251
fz	2	0.001162	0.001162	0.000581	0.46	0.687
ap	2	0.018126	0.018126	0.009063	7.10	0.123
Residual Error	2	0.002552	0.002552	0.001276		
Total	8	0.029470				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.08787	0.12295	0.05448
2	0.08942	0.09512	0.10882
3	0.15040	0.10962	0.16440
Delta	0.06253	0.02783	0.10992
Rank	2	3	1

7 priedas. Taguchi analizē: Užvartų aukščio pagal pastūmą

Linear Model Analysis: Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.024861	0.001155	21.516	0.002
Vc 50	-0.007588	0.001634	-4.644	0.043
Vc 100	-0.003393	0.001634	-2.077	0.173
fz 1.0	-0.004331	0.001634	-2.650	0.118
fz 1.5	0.003100	0.001634	1.897	0.198
ap 30	0.000939	0.001634	0.575	0.624
ap 60	0.000231	0.001634	0.141	0.900

S = 0.003466 R-Sq = 96.5% R-Sq(adj) = 86.1%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.000569	0.000569	0.000285	23.68	0.041
fz	2	0.000090	0.000090	0.000045	3.73	0.211
ap	2	0.000007	0.000007	0.000003	0.29	0.777
Residual Error	2	0.000024	0.000024	0.000012		
Total	8	0.000690				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.01727	0.02053	0.02580
2	0.02147	0.02796	0.02509
3	0.03584	0.02609	0.02369
Delta	0.01857	0.00743	0.00211
Rank	1	2	3

8 priedas. Taguchi analizē: Užvartų aukščio prieš pastūmą

Linear Model Analysis: Means versus Vc, fz, ap

Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.038146	0.004823	7.910	0.016
Vc 50	-0.002279	0.006820	-0.334	0.770
Vc 100	-0.009965	0.006820	-1.461	0.281
fz 1.0	-0.011186	0.006820	-1.640	0.243
fz 1.5	0.012839	0.006820	1.883	0.200
ap 30	0.002906	0.006820	0.426	0.711
ap 60	0.002059	0.006820	0.302	0.791

S = 0.01447 R-Sq = 80.7% R-Sq(adj) = 22.9%

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	0.000763	0.000763	0.000382	1.82	0.354
fz	2	0.000878	0.000878	0.000439	2.10	0.323
ap	2	0.000112	0.000112	0.000056	0.27	0.789
Residual Error	2	0.000419	0.000419	0.000209		
Total	8	0.002172				

Response Table for Means

Level	Vc	fz	ap
1	0.03587	0.02696	0.04105
2	0.02818	0.05099	0.04021
3	0.05039	0.03649	0.03318
Delta	0.02221	0.02403	0.00787
Rank	2	1	3

9 priedas. Magistro baigiamojo darbo tema parengtos publikacijos 1-as puslapis

The qualitative analysis of burr formation and surface roughness in micro-milling of titanium (Grade II)

Algis Marcinkevičius^{a,b}, Virginija Gylienė^a, Stefania Bruschi^c, Marco Sorgato^c

^a Production Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, Studentų st. 56, Kaunas, LT-51424, Lithuania

^b Company Machine tool Center, Kalvarijos st. 38, Kaunas, LT-46346, Lithuania

^c Department of Industrial Engineering, University of Padua, Via Venezia 1, Padova 35131, Italy

Abstract

The demand of medical implants are of high importance due to extended human life. Pure titanium or titanium alloys are the main materials for their production. Minute size, complex three dimensional shapes or the necessity of osseointegration are the main factors for the use of manufacturing techniques. Micromachining is used to manufacture micro-scale parts, even 3D complex parts then the selection of appropriate machining parameters goals for finish product quality.

This paper presents the experimental research of micro-milling of pure titanium (GradeII). Three level Taguchi's Design of Experiments (DOE) study of three cutting parameters (cutting speed, depth of cut, feed per tooth) was performed for the investigation of burr formation and areal surface topography. The micro-milling of grooves and finally the statistical analysis allowed defining the effect of burr's formation (the height and width) in up-milling and down milling. Also the surface roughness was evaluated by Non-contact 3D Surface Profiler and examined in five different positions of bottom of each groove.

Introduction

Titanium alloys offer high strength-to-weight ratio, high toughness, superb corrosion and creep resistance, biocompatibility and are used mainly in aerospace gas turbine, rocket, nuclear, chemical vessels and increasingly in biomedical applications [1].

Due to its apparent biocompatibility[2], titanium alloys are commonly used in micro tools for surgery as well as in small size biomedical implants [3]. New applications of biocompatibility materials and the production of micro structured components for applications in many areas especially in medical technology needs such technique as micromachining [3], [4] [5], [6]. Nevertheless this recent technology, the use of different kinds of hybrid cutting processes is growing. Their specific challenges are as follows: to cause localized thermal softening along the path of the cutting action [7], to improve the chip removal behaviour and the cooling of the machining zone [8] or even directly to bring the cooling effect to the chip formation zone [9], [10]. Finally, these goals focus on the realization of the machinability of advanced materials or the manufacturing of complex geometries.