

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

Valdas Mižutavičius

**ALIUMINIO LYDYNIŲ FRIKCINIO GREŽIMO IR
SRIEGIMO PROCESO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

lekt. dr. R.Česnavičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**ALIUMINIO LYDINIŲ FRIKCINIO GREŽIMO IR
SRIEGIMO PROCESO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (621H30001)

Vadovas

lekt. dr. R.Česnavičius

Recenzentas

Doc. dr. Povilas Krasauskas

Projektą atliko

Valdas Mižutavičius

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Valdas Mižutavičius

Mechanikos inžinerija (621H30001)

Baigiamojo projekto „Aluminio lydinių frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso tyrimas”

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 20 d

Kaunas

Patvirtinu, kad mano Valdo Mižutavičiaus baigiamasis projektas tema „Aluminio lydinių frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

TURINYS

SANTRAUKA	5
SUMMARY	6
MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS	7
ĮVADAS.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA	9
1.1 Frikcinio gręžimo ir sriegimo samprata.....	9
1.2 Frikcinio gręžimo įrankis.....	10
1.3 Frikciniam gręžimui ir sriegimui naudojamos medžiagos	12
1.4 Aliuminio frikcinis gręžimas	13
1.5 Nerūdijančio plieno frikcinis gręžimas.....	15
1.6 Nikelio lydinio frikcinis gręžimas	17
1.7 Titano frikcinis gręžimas	18
1.8 Literatūros apžvalgos išvados.....	18
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS	20
2.1 Tempimo bandymai	20
2.1.1 Eksperimentinė įranga ir medžiagos	20
2.1.2 Eksperimento rezultatai	21
2.2 Frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymai	23
2.2.1 Eksperimentinė įranga ir medžiagos	23
2.2.2 Eksperimento rezultatai	25
2.3 Eksperimentinės dalies išvados	42
3. MODELIAVIMAS.....	44
3.1 Modeliavimo samprata	44
3.2 Modelių kūrimas.....	45
3.3 Skaičiavimo modelis.....	45
3.4 Modeliavimo rezultatų palyginimas	47
3.5 Modeliavimo išvados.....	51
IŠVADOS.....	52
LITERATŪRA.....	54
PRIEDAI.....	57

Valdas Mižutavičius. Aliuminio lydinių frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Ramūnas Česnavičius. Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, mechanikos inžinerijos katedra.

Studijų kryptis ir sritis: technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: frikcinis gręžimas, kombinuotas įrankis, aliuminio sriegimas, aliuminis 1050A

Kaunas, 2016. 76 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra ištirti frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso metu atsirandančias ašines jėgas ir momentus, naudojant kombinuotą įrankį ir atskirų įrankių komplektą. Sudaryti kompiuterinį BE modelį ir palyginti rezultatus.

Darbe atlikta mokslinės literatūros analizė. Analizuoti Lietuvos ir užsienio mokslininkų straipsniai. Pasirinkta medžiaga tolimesniems frikcinio gręžimo bandymams – Al 1050. Atlikti eksperimentiniai bandymai, nustatant atsirandančias ašines jėgas ir momentus frikcinio gręžimo metu. Nustatyta parametrų priklausomybė rezultatams. Atlikta regresinė duomenų analizė su statistinių duomenų apdorojimo programa SPSS. Suformuluota regresinio modelio lygtis. Sudarytas kompiuterinis frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso modelis. Palyginti gauti rezultatai ir padarytos išvados.

Valdas Mižutavičius. Investigation of friction drilling and tapping process of aluminum alloys
.Master degree final project / supervisor Assoc. lekt. dr. Ramūnas Česnavičius.; Kaunas University of
Technology, mechanical engineering and Design faculty, mechanical engineering department.

Study area and field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: friction drilling, combination tool, tapping of aluminum, aluminum 1050A.

Kaunas, 2016. 76 p.

SUMMARY

The aim of this work is to investigate friction drilling and threading process axial forces and moments using the combination tool and individual tool kit. To create computer BE model and compare the results.

The review of scientific literature was made. The review of Lithuanian and other country articles was made. Material Al 1050 was chosen for further friction drilling process. Friction drilling experiments were made. During the experiment axial forces and moments were measured. Data regression analysis was made. Statistical data processing with SPSS program was made. 3D and mathematic model for the element of friction drilling and threading process were created. The results of friction drilling were compared and conclusions of friction drilling were made.

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas
Vytautas Grigas

(Parašas, data)

Mechanikos inžinerijos krypties studijų
programų vadovas Kęstutis Pilkauskas

(Parašas, data)

MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studijų programa: MECHANIKOS INŽINERIJA - 621H30001

Patvirtinta 2016 m. Gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu Nr. V 25-11-7

Išduota MDM 4/5gr. Studentui *Valdui Mižutavičiui*

1. Darbo tema: *Aliuminio lydinių frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso tyrimas. Investigation of friction drilling and tapping process of aluminum alloys.*
2. Darbo tikslas: *Ištirti frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso metu atsirandančias ašines jėgas ir momentus, naudojant kombinuotą įrankį ir atskirus įrankius. Sudaryti kompiuterinį BE modelį ir palyginti rezultatus.*
3. Darbo uždaviniai: *Atlikti mokslinės literatūros analizę (Lietuvoje ir užsienyje). Ištirti frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso metu atsirandančias ašines jėgas ir momentus, naudojant kombinuotą įrankį ir atskirus įrankius. Sudaryti kompiuterinį BE modelį ir palyginti rezultatus. Atlikti eksperimentinius tyrimus, nustatant ašines jėgas ir momentus. Sudaryti kompiuterinio frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso modelį, naudojant kombinuotą įrankį. Palyginti kompiuterinio modeliavimo rezultatus su gautais eksperimento metu; Suformuoti išvadas.*
4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos
5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis
6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas *iki*

(data)

Užduotį gavau: *Valdas Mižutavičius*

(studento vardas, pavardė, parašas)

(data)

Vadovas: *lekt. dr. Ramūnas Česnavičius*

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

IVADAS

Temos aktualumas. Vystantis pramonei ir technologijoms žengiant į priekį, tobulėja ir vystosi gamyboje naudojami įrankiai bei gamybos procesai. Standartinius metalo paruošimo ir apdirbimo metodus keičia nauji, patobulinti ir automatizuoti procesai. Neatsiejamas gamybos pramonėje naudojamų metalo gaminių apdirbimo procesas – kiaurymių grėžimas. Suformuotos kiaurymės kartu su privirintomis veržlėmis suformuoja neišardomą junginį, naudojamą įvairių konstrukcijų prijungimui. Kaip alternatyva kiaurymių grėžimui ir sriegio formavimui pasaulyje plačiai naudojama: frikcinis grėžimas ir sriegimas.

Lietuvoje frikcinis kiaurymių grėžimas ir sriegimas yra žinomas tik teoriniu aspektu arba atliekant bandymus. Daugiausiai yra atliekami tyrimai, kurių metu yra analizuojamos frikcinio metodo galimybės. Bandymus atlieka universitetų dėstytojai ir studentai. Toks skylių ir sriegių formavimo metodas nėra paplitęs tarp Lietuvos gamybos įmonių. Galima teigti, kad šis metodas visiškai nepropaguojamas, kaip alternatyva Lietuvos pramonėje. Siekiant parodyti tokio metodo privalumus ir yra atliekami įvairiausi bandymai, rašomos disertacijos bei straipsniai.

Darbo tikslas – ištirti frikcinio grėžimo ir sriegimo proceso metu atsirandančias ašines jėgas ir momentus, naudojant kombinuotą įrankį ir atskirus įrankius. Sudaryti kompiuterinį BE modelį ir palyginti rezultatus.

Uždaviniai:

- Atlikti mokslinės literatūros analizę (Lietuvoje ir užsienyje);
- Ištirti frikcinio grėžimo ir sriegimo proceso metu atsirandančias ašines jėgas ir momentus, naudojant kombinuotą įrankį ir atskirus įrankius. Sudaryti kompiuterinį BE modelį ir palyginti rezultatus. Atlikti eksperimentinius tyrimus, nustatant ašines jėgas ir momentus;
- Sudaryti kompiuterinio frikcinio grėžimo ir sriegimo proceso modelį, naudojant kombinuotą įrankį;
- Palyginti kompiuterinio modeliavimo rezultatus su gautais eksperimento metu;
- Suformuoti išvadas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Frikcinio gręžimo ir sriegimo samprata

Frikcinis gręžimas – kiaurymių formavimas nepašalinant medžiagos nuo metalo paviršiaus. Tradiciniais metodais formuojant kiaurymes, medžiaga yra pašalinama iš ruošinio ir taip suformuojama kiaurymė. Frikcinio metodo metu medžiaga nėra pašalinama, o plastiškai deformuojama, siekiant sustiprinti pačią kiaurymę. Frikcinio gręžimo metodu formuojamos kiaurymės nuo \varnothing 2 mm skersmens iki \varnothing 32 mm skersmens. Kiaurymės gręžiamos metaluose, kurių storis siekia nuo 1 mm iki 10 mm. Naudojamas kiaurymių formavimui įvairiuose plieno markėse, nerūdijančiame pliene, varyje, žalvaryje, aliuminyje ir kituose kaliumosiuose metaluose. Šiuo metodu kiaurymės yra formuojamos apvaliuose, kvadratinuose, stačiakampės formos vamzdžiuose, kampiniuose, kanaluose ir kitokios formos metalo gaminiuose.

Frikcinio gręžimo pritaikomumas ir privalumai:

- Vidutiniškai M8 ar M10 sriegis formuojamas nuo 2 iki 4 sekundžių;
- Suformuotos kiaurymės stiprumas daug didesnis nei privirinus veržles;
- Užtikrina didelį konstrukcijos saugumą, nei įpresuotos įvorės;
- Nereikalaujantis papildomų išlaidų. Nereikia virinamos veržlės ir virinimo priemonių;
- Lengva pritaikyti visoms naudojamoms geros kokybės gręžimo staklėms su kintančiu suklio sukimosi greičiu ir koreguojama gręžimo galia. Naudojamos staklės: CNC gręžimo, tiksliojo frezavimo staklės, CNC centras;
- Skylės tikslumas siekia 0,1 mm;
- Tinka automatizuotam skylių gręžimui;
- Pritaikomumas įvairiose pramonės šakose: baldų pramonėje, automobilių pramonėje, šildymo ir šaldymo sistemų pramonėje, ūkio pramonėje, architektūroje ir kitur.

Frikcinis gręžimas yra neįprastas kiaurymių formavimo metodas. Toks kiaurymių formavimas plonasienuose metaluose naudojamas kartu su sriegio sriegimo operacija. Naudojamų sriegiklių vaizdas pateikiamas 1.1 paveikslėlyje. Tokiu metodu suformuojamos kiaurymės atitinka tradiciniais metodais atliktas operacijas, tokias kaip: veržlių privirinimas, įvorių įpresavimas ir kaip pagalbinė kiaurymė gaminio konfigūracijoje, pritvirtinti nenumatytiems elementams [1].



1.1 pav. Frikciniai sriegikliai

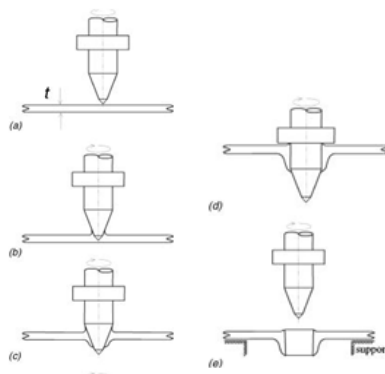
1.2 Frikcinio gręžimo įrankis

Frikcinio gręžimo įrankis gaminamas iš volframo karbido. Kūgio formos įrankio geometrija yra pasirinkta neatsitiktinai, o remiantis atliktų skaičiavimų ir bandymų rezultatais. Naudojamo įrankio geometrijos vaizdas pateiktas 1.2 paveikslėlyje.



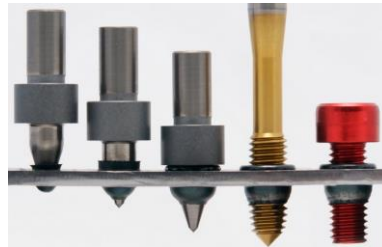
1.2 pav. Volframo karbido įrankis

Gręžimo proceso metu tarp įrankio ir medžiagos atsirandanti trintis, tinkamai parinkti gręžimo greičiai ištempia metalo ruošinyje kiaurymę ir metalo paviršiuje suformuoja poveržlės paskirtį atliekančią briauną. Tinkamas sukimosi momentas ir reikiama pastūma metalo paviršiuje sukuria trintį tarp įrankio ir medžiagos. Atsiradusi trintis tarp metalo ir įrankio sukelia didelius temperatūros svyravimus. Atsirandanti temperatūra gali siekti 900°C ir daugiau. Metalo paviršius toje zonoje tampa labai plastiškas ir prisitaikantis prie kiaurymės formavimo įrankio formos. Besisukantis kūginis įrankis prasiskverbia per medžiagą ištemdamas ją ir suformuodamas vientisą kiaurymę. Įrankis su tam tikra pastūma prasiskverbia per metalo paviršių ir deformuoja medžiagą suteikdamas jai skylės pavidalo formą. Kiaurymės formavimo eiga pateikiama 1.3 paveikslėlyje.



1.3 pav. Kiaurymės formavimas

Pirmiausia įrankis privedamas prie metalo ruošinio (žr. 1.3 (a) paveikslėlyje). Įrankis tam tikra pastūma juda vertikalia ašimi, skverdama į metalą ir jį plastiškai deformuodamas (žr. 1.3 (b,c,d) paveikslėlyje). Įrankiui galutinai suformavus kiaurymę, jis yra pašalinamas iš metalo ruošinio (žr. 1.3 (d) paveikslėlyje). Suformuota kiaurymės forma dažniausiai būna tris ar net keturis kartus storesnė nei gręžiamas ruošinys. Kiaurymės ir sriegio formavimo eiga matoma 1.4 paveikslėlyje [1].



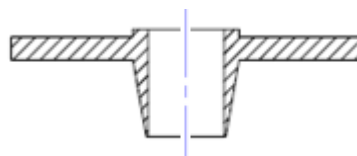
1.4 pav. Gręžimo ir sriegimo procesas.

Galimos dviejų tipų frikcinio gręžimo įrankio modifikacijos. Priklausomai kokio tipo kiaurymę norime suformuoti, pasirenkama ir įrankio konstrukcija. Įrankis gali būti dviejų tipų: su užapvalinta darbine dalimi ir su nupjovimo briauna. Esant užapvalintai darbinei daliai įrankis nepašalina medžiagos likusios frikcinio gręžimo metu, o suformuoja poveržlę. Tokio įrankio konstrukcija pateikiama 1.5 paveikslėlyje.



1.5 pav. Įrankio konstrukcija su užapvalinta briauna

Tokiu įrankiu suformuotos kiaurymės viršutiniame paviršiuje susiformuoja papildomas metalo žiedas. Suformuotas metalo žiedas atlieka poveržlės paskirtį. Suformuotos kiaurymės vaizdas pateiktas 1.6 paveikslėlyje.



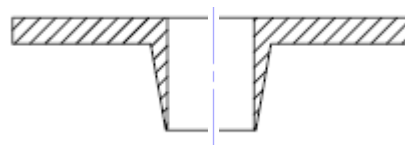
1.6 pav. Kiaurymės forma su metalo žiedu

Taip pat gamyboje naudojamas įrankis su nupjovimo briauna. Esant papildomai briaunai likutinis medžiagos kiekis yra neišformuojamas, o pašalinamas nuo ruošinio medžiagos. Įrankio konstrukcija pateikiama 1.7 paveikslėlyje.



1.7 pav. Įrankio konstrukcija su nupjovimo briauna

Suformavus kiaurymę tokiu įrankiu, paviršiuje nesuformuojamas metalo žiedas. Medžiaga yra nupjaunama nuo kiaurymės paviršiaus. Suformuotos kiaurymės vaizdas pateiktas 1.8 paveikslėlyje.



1.8 pav. Kiaurymės forma be metalo žiedo

1.3 Frikciniam gręžimui ir sriegimui naudojamos medžiagos

Frikcinio gręžimo metodas naudojamas visoms besilydančioms medžiagoms. Pagrindinis metodo privalumas – medžiaga nėra pašalinama iš metalo paviršiaus, o plastiškai deformuojama. Toks kiaurymių formavimas plonasieniuose metaluose yra naudojamas kartu su sriegio sriegimo operacija.

Pramonėje, kur dažnai naudojami plonasieniai metalai ir įvairios cheminės sudėties plienai ar kiti metalai, suformuoti kiaurymę ir sriegį metalo ruošinyje yra neįmanoma. Todėl papildomai naudojamos pagalbinės operacijos: gręžimas ir virinimas. Pati virinimo operacija plienams nėra sudėtinga, tačiau spalvotiesiems metalams ar kitoms cheminės sudėties medžiagoms reikalauja papildomų gamybos resursų ir išteklių. Atliekant paprastą gręžimo operaciją grąžtu, esant skirtingam metalo tipui kiaurymės išgręžimas gali užtrukti nuo kelių iki keliolikos minučių. Nevisi metalai ir jų atmainos pasiduota jų formavimui. Reikia atitinkamai pasirinkti geresnės kokybės grąžtus ir kartais naudoti skirtingus grąžto užgalandimo kampus. Visa procesą palengvina ir supaprastina frikcinio gręžimo metodas. Parinkus tinkamą įrankio pastūmą ir sukimosi greitį kiaurymės plonasieniuose metaluose suformuojamos per kelias sekundes. Tokiu metodu galima greitai pereiti nuo vienos rūšies medžiagų prie kitos.

1.4 Aliuminio frikcinis gręžimas

Plienas dažnai gali būti pakeistas aliuminiu ar jo lydiniu, kur nereikia didelio stiprumo, bet labai svarbus konstrukcijos ar elemento svoris. Aliuminis yra santykinai lengvas, minkštas ir plastiškas. Aliuminio lydinį 5052-H32 tyrė mokslininkai Scott F. Miller, Peter J. Blau, ir Albert J. Shih (2005). Tiriant aliuminio lydinį 5052-H32 pasirinkti režimai: sukimosi greitis – 3600 min⁻¹, įsigilinimo greitis – 164 mm/min [3].

Bandymo tikslas – ištirti medžiagos struktūrą ir medžiagos savybes frikcinio gręžimo metu, esant skirtingoms darbo sąlygoms. Rezultatai parodė vidinės kiaurymės paviršiaus pažeidimus. Akivaizdžiai matomas medžiagos atsisluoksniavimas ir plastiškai deformuoti taškai. Vidinis paviršius padengtas giluminiais įrežimais. Tokius pažeidimus sukėlė aliuminio prilipimas prie darbo įrankio. Didžiulis slėgis ir didelė temperatūra darbo metu „suvirina“ du aktyvius paviršius. Esant suvirinimo energijai didesnei, nei pačios medžiagos dalelių tarpusavio traukos energijai, įrankis tiesiog išplėšia medžiagos gabalus iš ruošinio [3].

Mokslininkai Zülküf Demir ir Cebeli Özek (2013) tyrė Aliuminio lydinį A7075-T651. Tiriant A7075-T651 aliuminio lydinį pasirinkti tokie įrankio sukimosi greičiai: 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 min⁻¹ ir atitinkamai įsigilinimo greičiai: 20, 40, 60, 80, 100 mm/min [4].

Bandymo tikslas – pagerinti suformuotos kiaurymės įvorės formą ir ištirti gautos kiaurymės paviršiaus šiurkštumą ir įvorės formas. Bandymo metu bandiniai prieš frikcinio gręžimo operaciją buvo pragręžti tam tikro skersmens grąžtu, siekiant išgauti kuo tolygesnę kiaurymės formą. Taip pat pamatuota temperatūra proceso metu. Geriausias paviršiaus šiurkštumas pasiektas esant 3600 min⁻¹ ir 100 mm/min pastumai. Paviršiaus šiurkštumas siekė 1 μm.

Bandymas atliktas esant pradinei 2 mm kiauryme, formuojant 6 mm kiaurymę. Stebėta suformuojamos įvorės kokybė. Be paruošiamosios kiaurymės, kol buvo pasiekta reikiama darbo temperatūra deformavosi darbo paviršius. Šis deformavimas ant suformuotos įvorės sukėlė aiškiai matomus įtrūkimus ir suformavo žiedlapio formos įvorę. Pakartojus bandymą su pirmine kiauryme, tokių pažeidimų nebeliko. Atliekant kitus bandymus su pirmine kiauryme, gauti geresni rezultatai. Glotnesnis paviršius ir geresnė įvorės forma [4].

Mokslininkai P. V. Gopal Krishna, K. Kishore ir V. V. Satyanarayana (2010) atliko frikcinio gręžimo bandymus aliuminio AA6351 lydiniui. Atliekant bandymus pasirinkti įrankio sukimosi greičiai: 2000 min⁻¹ ir 3000 min⁻¹. Įrankio įsigilinimo greičiai: 200 mm/min ir 900 mm/min [5].

Bandymo tikslas – ištirti mechaninius procesus frikcinio gręžimo metu, naudojant gręžimo įrankį pagamintą iš greitapjūvio plieno. Sukurti ašinės jėgos ir sukimo momento matematinius

modelius. Suprojektuoti galimą eksperimentinio bandymo eigą ir pritaikyti matematinius modelius pagerinti trinties našumą darbo vietoje.

Bandymo metu paaiškėjo, kad labai didelę įtaką turi įrankio forma. Labai svarbus parametras – įrankio kūginis kampas. Kūgio pasvirimo kampas turi didelę įtaką sukuriamam sukimosi momentui ir jėgai. Įrankiui sukantis vidutiniu greičiu, pastebėta geriausia kiaurymės forma ir paviršiaus glotnumas [5].

Mokslininkai Cebeli Ozek ir Zulkuf Demir (2013) atlikinėjo bandymus skirtingos cheminės sudėties aliuminio lydiniams. Tirti keturi skirtingi aliuminio lydiniai: A1050, A6061, A5083, ir A7075-T651. Bandymai atlikti esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams: 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 4200 min¹. Atitinkamai kiekvienam sukimosi greičiui parinktas įrankio įsigilinimo greitis: 25, 50, 75, 100 mm/min [6].

Bandymo tikslas – ištirti mechaninius procesus frikcinio gręžimo metu ir išmatuoti temperatūrą frikcinio gręžimo metu. Išnagrinėti gauto paviršiaus šiurkštumą ir ištirti suformuotos įvorės aukščio priklausomybes nuo įrankio sukimosi greičio, pastūmos ir naudojamų medžiagų šilumos laidumo koeficiento [6].

Bandymo metu dideliu įrankio sukimosi greičiu pasiekta aukšta trinties temperatūra naudojant aliuminio lydinius pasižyminčius žemu šilumos laidumo koeficientu. Didžiausia išmatuota temperatūra 241,8 °C pasiekta A5083 aliuminio lydiniui. Tokie duomenys gauti įrankiui sukantis 4200 min¹ greičiu ir esant 25 mm/min įsigilinimo greičiui. Aliuminio A5083, A6061 ir A8075-T651 lydiniuose geriausias suformuotų kiaurymių paviršiaus šiurkštumas pasiektas esant 2400 min¹ sukimosi greičiui. Keičiant įsigilinimo greitį nepastebėta aiškiai išsiskiriančio paviršiaus. Visų parinktų pastūmų paviršiaus šiurkštumas gautas vienodas. Blogiausia įvorės forma gauta esant 1200 min¹ sukimosi greičiui, o geriausia esant 1800 min¹.

Mokslininkai Scott F. Miller, Jia Tao, Albert J. Shih (2005) ištyrė aliuminio Al 380 elgseną frikcinio gręžimo metu. Tyrimo metu pasirinkti tokie įrankio sukimosi greičiai: 3000, 5500, 7000, 11000, 15000 min¹ ir pastūmos: 254, 305, 356, 406 mm/min [6].

Tyrimo tikslas išsiaiškinti kaip skiriasi gręžimo parametrai kintant ruošinio temperatūrai. Matuota naudojama staklių galia ir įrankio sukimosi momentas gręžiant kiaurymę skirtingo metalo ruošinyje [7].

Atlikus bandymus paaiškėjo, kad didelę įtaką staklių režimų parinkimui turi ruošinio temperatūra. Esant didesnei ruošinio temperatūrai lengviau formuojama kiaurymė ruošinyje. Naudojamas mažesnis staklių pajėgumas. Didžiausia galia naudojama skykės formavimui esant

didžiausei staklių pastūmai. Pastūma keičiama nuo 305 iki 356 mm/min. Pastebima tiesinė priklausomybė nuo ruošinio temperatūro ir reikalingos didžiausios galios. Esant didesniai ruošinio temperatūrai reikalinga mažiausia galia ir mažiausias energijos kiekis [7].

1.5 Nerūdijančio plieno frikcinis grėžimas

Agresyviose aplinkose dažnai naudojamas plienas turintis didesnę atsparumą korozijai. Tokiose aplinkose naudojamas nerūdijantis plienas AISI. Plienui AISI 1015 mokslininkai Scott F. Miller, Peter J. Blau, Albert J. Shih (2006) atliko frikcinio grėžimo bandymus. Bandymo metu pasirinktas įrankio sukimosi greitis 2800 min¹. Parinktas įrankio įsigilinimo greitis 254 mm/min [8].

Bandymų tikslas – ištirti įrankio nusidėvėjimą ir geometrijos pakitimą frikcinio grėžimo metu. Atlikus bandymus ir ištyrus įrankio būklę pastebėtas minimalus įrankio nudilimas. Tai rodo didelį įrankio patvarumą darbo metu. Keičiant įrankio sukimosi momento reikšmes nepastebėtas ženklus įrankio dėvėjimasis esant kuriam nors sukimosi greičiui [8].

Mokslininkai Pantawane. P.D, Ahuja. B.B (2011) tyrė plieną AISI 1015. Tyrimo metu pasirinkti įrankio sukimosi greičiai: 2086, 2500, 3500, 4500, 4910 min¹. Atitinkami sukimosi greičiams parinkti ir įrankio įsigilinimo greičiai: 17.36, 90, 135, 180, 198.64 mm/min [9].

Darbo tikslas – optimizuoti frikcinio grėžimo parametrus. Šiame darbe autoriai tyrė frikcinio grėžimo naudojamų parametrų: sukimosi greičio, pastūmos, įrankio skersmens, poveikį kiaurymės matmenų paklaidoms ir paviršiaus šiurkštumui.

Atlikus tyrimus, padarytos konkrečios išvados. Atlikus trisdešimt skirtingų bandymų pastebėta, kad mažiausią įtaką matmenų nuokrypiams turi įrankio sukimosi greitis. Tačiau įrankio sukimosi greitis turi didelę įtaką paviršiaus šiurkštumui. Keičiant įrankio sukimosi greitį nuo 2500 min¹ iki 4500 min¹, paviršiaus šiurkštumas kinta nuo 0,536 μm iki 0,341 μm. Atitinkamai gautas matmenų neatitikimas siekia nuo 0,452 μm iki 0,497 μm, kintant įrankio įsigilinimo greičiui nuo 71,36 mm/min iki 198,64 mm/min. Atlikus optimizavimo procesą gauti optimalūs įrankio parametrai. Optimaliausias įrankio sukimosi greitis siekia 4500 min¹ ir įsigilinimo greitis 71,36 mm/min [9].

Mokslininkai P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačenga (2001) tyrė plieną AISI 304. Bandymų metu pasirinktas įrankio sukimosi greitis – 3000 min¹. Atitinkamai pasirinkta ir pastūma – 100 mm/min [10].

Tyrimo tikslas – atlikti eksperimentinius frikcinio grėžimo bandymus parinktam plienui ir gauti grėžimo parametrus. Atlikti grėžimo proceso simuliaciją ir palyginti gautuosius rezultatus su eksperimentiniais. Atlikta plieno AISI 304 frikcinio grėžimo proceso eksperimentinė analizė ir skaitinis modeliavimas. Atlikus bandymus išmatuotos grėžimo metu susiformavusios ašinės jėgos ir

momentai. Atlikus modeliavimo darbus baigtinių elementų metodo pagrindu, palyginti gauti rezultatai su eksperimentiniais. Padarytos išvados, kad modeliavimo metu priimtos prielaidos yra teisingos ir sutampa su rezultatais, gautais eksperimento metu [10].

Mokslininkai Wei-Liang Ku, Ching-Lien Hung, Shin-Min Lee, Han-Ming Chow (2010) atliko frikcinio gręžimo bandymus plienui AISI 304. Bandymo metu pasirinkti skirtingi sukimosi greičiai ir pastūmos. Priimti įrankio sukimosi greičiai : 1200, 2400, 3600 min¹. Atitinkamai priimti ir įrankio įsigilinimo greičiai: 75, 125, 150 mm/min [11].

Bandymų tikslas – optimizuoti frikcinio gręžimo procesą. Ištirti trinties kampo, trinties kontakto ploto, sūklės, pastūmos, sukimosi greičio parametrų poveikį paviršiaus šiurkštumui ir suformuotos kiaurymės ilgiui.

Atlikus tyrimus padarytos išvados, kad frikcinio gręžimo įrankio kampas ir sukimosi greitis turi didžiausią įtaką formuojamam paviršiaus šiurkštumui. Geriausi rezultatai gauti įrankiui sukantis 3600 min¹ greičiu ir gilinantis 100mm/min pastūma, pasvirus α 30⁰ įrankio kampui. Optimaliausia įvorės forma ir ilgis gautas prie tokių įrankio darbo režimo parametrų: 1200, 75 mm/min ir įrankio kampui pasvirus α 60⁰ [11].

Mokslininkai Scott Fmiller, Rui Li, Hsin Wang ir Albert J,Shin (2006) nagrinėjo plieną AISI 1020 ir jo būseną frikcinio gręžimo metu. Bandymai atlikti esant konkrečiam sukimosi greičiui ir pastūmai. Priimtas įrankio sukimosi greitis siekia 4000 min¹. Parinktas įrankio įsigilinimo greitis – 165 mm/min [12].

Darbe tiriama mechaninių ir terminių poveikių įtaka medžiagai frikcinio gręžimo metu. Eksperimentiškai išmatuojama traukos jėga ir sukimosi momentas. Bandymų tikslas – atlikus bandymus priimti teisingas išvadas, kad būtų galima optimizuoti frikcinio gręžimo parametrus. Atliekant bandymus, išmatuota traukos jėga ir sukimosi momentas. Medžiagos ir įrankio temperatūra kontakto metu matuota su specialia infraraudonųjų spindulių kamera. Gauta maksimali traukos jėga 750 N. Eksperimentiškai gauta jėga 700 N, atitinka modeliavimo metu gautus rezultatus. Įrankio sukimosi momentas priimtas 1,6 Nm [12].

Mokslininkai Scott F. Miller, Peter J. Blau, and Albert J. Shih (2005) ištyrė skirtingas plieno rūšis. Tirti plienai bandymo metu: AISI 1020, AISI 4130. Bandymai atlikti esant konkrečiam įrankio sukimosi greičiui ir pastūmai, atsižvelgiant į metalo markę. Plienui AISI 1020 ir AISI 4130 parinktas sukimosi greitis – 2800 min¹ ir įsigilinimo greitis – 164 mm/min [13].

Bandymų tikslas – ištirti medžiagos mikro struktūrą ir medžiagos savybes frikcinio gręžimo metu, esant skirtingoms darbo sąlygoms. Atlikus bandymus gauta, kad nuo kiaurymės paviršiau 60 μ m

atstumu pastebimas geriausias metalo struktūros grūdelių išsidėstymas. Grūdelių dydis pastebimas 1 μm dydžio ar mažesnis. Didžiausias paviršiaus kietumas plienui AISI 1020 pamatuotas nutolus nuo kiaurymės paviršiaus 120 μm . Plienui AISI 4130 didžiausias kietumas išmatuotas 60 μm atstumu nuo paviršiaus [13].

1.6 Nikelio lydinio frikcinis grėžimas

Nikelis – pagrindinis nikelio lydinių komponentas. Dažniausiai vartojami nikelio lydiniai su chromu, variu, aliuminiu, titanu ir molibdenu. Nikelio lydiniai atsparūs korozijai, plastiški ir stiprūs. Monelis – konstrukcinis nikelio lydinys. Iš jo gaminamos atsparios korozijai, stiprios detalės, naudojamos chemijos, medicinos, naftos pramonėje, laivų statyboje.

Mokslininkai Shin Min Lee, Han Ming Chow ir Biing Hwa Yan (2007) atliko frikcinio grėžimo bandymus nikelio lydiniui. Bandymai atlikti prie tam tikrų įrankio sukimosi greičių ir pastūmų. Priimti įrankio sukimosi greičiai: 2400, 3600, 4800, 60000 min^{-1} . Taip pat atitinkamai parinkti įrankio įsigilavimo greičiai: 100, 125, 150 mm/min [14].

Bandymų tikslas – ištirti medžiagos paviršiaus kietumą ir paviršiaus šiurkštumą aplink suformuotą kiaurymę. Ištirti kiaurymės briaunos užapvalinimus, suformuotus grėžimo įrankio.

Atlikus bandymus gauti rezultatai. Pirmiausia gautas medžiagos kietumo grafikas esant skirtingiems grėžimo greičiams. Didžiausias kietumas gaunamas esant didžiausiam suklio greičiui 6000 min^{-1} . Kiečiausia vieta – suformuotos kiaurymės kraštas. Medžiagos kietumas tirtas 0,1 mm atstumu nuo kiaurymės krašto. Sukimosi greičiui išliekant pastoviam, pastebima kietumo priklausomybė nuo pastūmos. Pastūmai didėjant, paviršiaus kietumas mažėja. Esant pastoviai pastūmai, pastebimas atvirkščias reiškinys tarp sukimosi greičio ir pastūmos. Kuo didesnis sukimosi greitis, tuo mažesnis paviršiaus kietumas. Ištirta medžiagos paviršiaus struktūra esant skirtingiems sukimosi greičiams. Sukantis mažiausiu sukimosi greičiu, mažiausiai šilumos energijos perduodama ir mažiausias paviršius plotas yra šildomas. Darbo paviršius aušta greičiau, formuodamas tinkamos struktūros grūdelius išilgai skylės krašto, kur gaunamas didesnis kietumas. Didelis sukimosi greitis išskiria daug šilumos ir šildomas didelis paviršiaus plotas. Įkaitintas paviršius aušta lėtai, suformuodamas stambios struktūros grūdelius, kas mažina kietumą. Analizuoti kiaurymės užapvalinimai nuo kintančių grėžimo režimų. Esant pastoviai pastūmai, egzistuoja linijinis ryšys tarp sukimosi greičio ir užapvalinimų. Kuo didesnis greitis, tuo formuojami geresni užapvalinimai. Didelis sukimosi greitis suteikia daug šilumos, didesnis plotas šildomas, tačiau ilgėja atvėsimo laikas. Ilgas aušimo laikas leidžia susiformuoti geresniems užapvalinimams. Geriausias efektas yra esant mažiausiam sukimosi greičiui. Kitaip tariant, didelis sukimosi greitis formuoja geresnius užapvalinimus, tačiau keisti kiaurymės užapvalinimo kokybę, mažinant sukimosi greitį yra

nenaudinga. Pastebima tendencija, kad esant pastoviai pastūmai, atsiranda linijinis ryšys tarp paviršiaus šiurkštumo RA ir sukimosi greičio. Didelis sukimosi greitis suteikia geresnį paviršiaus šiurkštumą RA. Didesnė pastūma suteikia didesnę trintį ir gaunama aukštesnė lydymosi temperatūra, kuri įtakoja geresnį paviršiaus šiurkštumą RA. Didelis sukimosi greitis yra naudingesnis negu didelė pastūma [14].

1.7 Titano frikcinis grėžimas

Titanas yra lengvas, blizgantis, tvirtas, atsparus korozijai metalas. Titanas naudojamas lengvuose, mechaniškai atspariuose lydiniuose. Dažniausiai su aliuminiu ir plieniu. Titano lydiniai dėl mažo tankio, mechaninio tvirtumo, atsparumo korozijai, naudojami konstruojant lėktuvus, gaminant kaulų implantus bei skirti naudoti agresyviose aplinkose.

Mokslininkai Scott F. Miller, Peter J. Blau, and Albert J. Shih (2005) atliko frikcinio grėžimo bandymus titano lydiniai CPTi. Bandymai atlikti pasirinkus konkretų įrankio sukimosi greitį – 1000 min¹ ir įrankio įsigilinimo greitį – 164 mm/min [15].

Bandymų tikslas – ištirti medžiagos mikro struktūrą ir medžiagos savybes frikcinio grėžimo metu, esant skirtingoms darbo sąlygoms.

Atlikti frikcinio grėžimo bandymus su titano medžiaga buvo sudėtinga. Išmatuotas suformuotos įvorės aukštis ir diametras. Gauta įvorė po frikcinio grėžimo bandymo yra nedidelio aukščio ir santykinai plati, lyginant kitų medžiagų rezultatus. Bandymo metu buvo būtina sumažinti įrankio sukimosi greitį ir papildomai tepti kontakto vietą specialiu tepalu, siekiant užtikrinti tinkamą kiaurymės ir įvorės formą. Tačiau nepaisant įvairių priimtų sprendimų, nepavyko užtikrinti tinkamai suformuotos kiaurymės paviršiaus. Suformuotame paviršiuje aiškiai matėsi medžiagos pažeidimai. Darbo medžiagoje matėsi medžiagos atsiskuoniavimas ir ištrupėjusios medžiagos kišenės ir įtrūkimai. Pastebėti paviršiaus įtrūkimai buvo 20 μm ilgio ir 50 μm pločio. Tokių įtrūkimų galimos priežastys, dėl įtempių koncentracijos medžiagos sluoksnių atsiskyrimo vietose. Taip pat pastebėti medžiagos įtrūkimai nuo 5 μm iki 8 μm dydžio pagrindinės ir deformuotos medžiagos sankirtos vietose. Tokie įtrūkimai greičiausiai susiformavo frikcinio grėžimo metu dėl aukštų temperatūrų skirtumų metalo paviršiaus sluoksniuose [15].

1.8 Literatūros apžvalgos išvados

Atlikta mokslinės literatūros apžvalga. Trumpai aprašyti frikcinio grėžimo bandymų rezultatai, pateikti bandymų tikslai ir jų metodika. Išskirtos bandymų metu naudotos medžiagos, surašyti naudoti įrankio sukimosi greičiai ir pastūmos. Atlikus mokslinių straipsnių analizę,

suformuota medžiagų lentelė, atspindinti bandiniuose naudotas medžiagas ir jų storį. Bandymuose naudotos medžiagos ir gręžimo parametrai pateikiami 1 priede.

Daugiausiai buvo atliekami frikcinio gręžimo bandymai, naudojant aliuminio lydinius ir nerūdijantį plieną. Tirti skirtingi metalų storiai. Daugiausiai tirti plieno lydiniai kurių storiai neviršija 2 mm. Įrankio sukimosi greičiai kinta nuo 2086 min¹ iki 4914 min¹. Įrankio įsigilinimo greitis kinta nuo 71.36 mm/min iki 198.64 mm/min. Aliuminio bandymai atliekami su storesniais metalais. Metalų storis kinta nuo 1.62 mm iki 6 mm. Bandymai atlikti įrankiui sukantis greičiu nuo 1200 min¹ iki 15 000 min¹. Įrankio įsigilinimo greitis kinta nuo 25 mm/min iki 900 mm/min

Atsižvelgiant į gautus analizės rezultatus bei turimą įrangą, frikcinio gręžimo bandymams pasirinkti aliuminio markės lydinys. Bandymams pasirinkta aliuminio markė Al 1050, plačiai naudojama Lietuvos metalo pramonėje. Kadangi aliuminis yra minkštas ir plastiškas, įrankio dėvėjimasis eksperimentų metu yra minimalus. Galima atlikti daugelį bandymų su minimaliais nuostoliais. Taip pat įrankio gamybai nereikalinga stipri ir patvari medžiaga, tokia kaip volframo karbidas. Įrankis gali būti gaminamas iš paprastesnės ir pigesnės medžiagos, tokios kaip greitapjūvis plienas. Kadangi galima nesudėtinga įrankio gamyba, eksperimentų metu bus galima atlikti įvairius frikcinio gręžimo bandymus aliuminio lydiniai. Bus gaminami dviejų konfigūracijų įrankiai. Pirmiausia gaminamas atskiras įrankis gręžimui ir naudojamas standartinis formeris sriegio formavimui. Toliau bus galima pasigaminti kombinuotą įrankį. Tokiu įrankiu bus galima išgręžti kiaurymę ir joje prasriegti sriegį. Turint kelių įrankių bandymų rezultatus, bus galima palyginti įrankio efektyvumą atliekant tapačią operaciją, vienodais įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiais.

Taip pat šiuo magistrinio baigiamuoju darbu bus stengiamasi parodyti frikcinio gręžimo panaudojimo galimybes ir pritaikomumą gamybos pramonėje. Turint reikiamą informaciją bus galima įsivertinti tokio proceso naudingumą gamyboje. Palyginti sriegio formavimo operaciją atliekama standartiniais metodais ir tokia pat operaciją atliekant frikcinio gręžimo metodu. Tiek atskirais ar kombinuotu įrankiu.

2. EKSPERIMENTINĖ DALIS

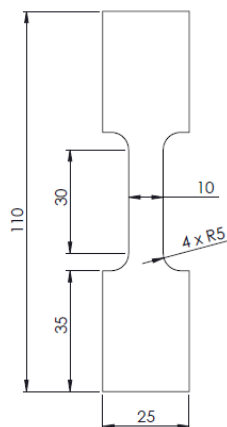
2.1 Tempimo bandymai

Medžiagos mechaninėms savybėms nustatyti yra atliekami įvairūs medžiagų mechaniniai bandymai. Vienas iš daugelio galimų medžiagos bandymų – medžiagos tempimo bandymas. Tempimo bandymo metu gaunamos svarbiausios medžiagos mechaninės charakteristikos. Svarbiausios medžiagos charakteristikos – stiprumo, tamprumo ir plastiškumo ribos bei jų reikšmės. Bandymo metu piešiama įtempių tempimo diagrama.

Medžiagų mechaninių savybių nustatymo bandymai atliekami laikantis norminiais dokumentais nustatytų sąlygų. Bandymai atliekami remiantis turimos bandymo mašinos aprašu. Bandinių ruošiniai pasirinkti ir pagaminti pagal turimus bandymo mašinos griebtuvus. Ruošinio forma ir storis pasirenkami, atsižvelgiant į bandymų mašinos mechanines charakteristikas ir žinynuose rastą informaciją.

2.1.1 Eksperimentinė įranga ir medžiagos

Frikinio gręžimo bandymams naudotas aliuminis AL 1050. Bandymams naudoti specialios formos 1 mm ruošiniai. Tempimo bandymams paruoštų ruošinių brėžinio eskizas pateikiamas 2.1 paveikslėlyje. Bandymai atlikti naudojant dinaminių bandinių mašiną – INSTRON E10000. Bandymų mašinos vaizdas pateikiamas 2.1 paveikslėlyje.



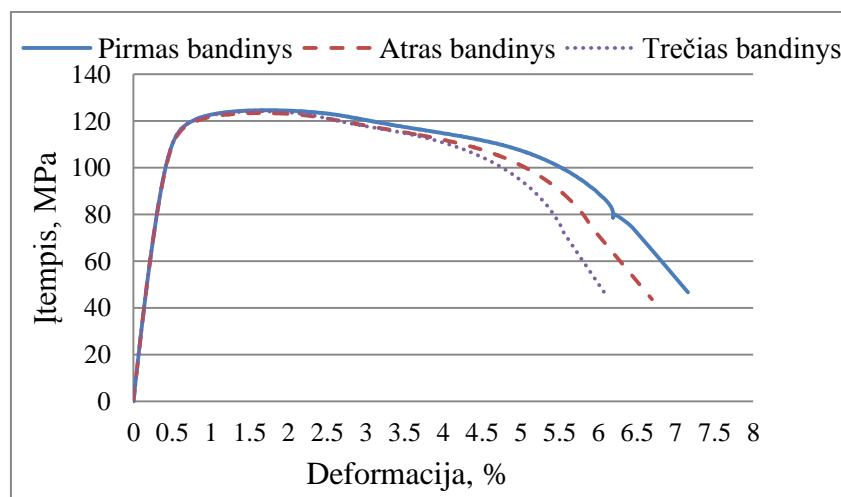
2.1 pav. Bandinio modelis su matmenimis ir bandinio vaizdas INSTRON bandymų mašinoje

INSTRON E10000 – bandymų mašina, skirta dinaminiam ir statiniam, įvairių medžiagų ir komponentų tyrimo bandymams. Dinaminio apkrovimo pajėgumas ir ilgalaikis statinis apkrovimas iki 10 kN. Bandinių mašinai energija tiekama iš vienfazio maitinimo šaltinio, be papildomų hidraulinių ar

suslėgto oro resursų. Suderintas cilindrinų kreipiančiųjų darbas su servo pavara, suteikia didelį įrenginio standumą bandymo metu

2.1.2 Eksperimento rezultatai

Tempimo metu INSTRON programinės įrangos lange automatiškai buvo piešiama bandinio tempimo diagrama. Tempimo diagrama parodo tempiančios jėgos ir bandinio pailgėjimo ryšį. Tempimo diagramoje aiškiai matoma apkrovimo jėgos reikšmė ir ruošinio pailgėjimas. Taip pat matoma apkrova reikalinga ruošiniui nutraukti. Iš tempimo diagramos nustatomos svarbiausios tiriamos medžiagos mechaninių charakteristikų reikšmės. INSTRON bandymų mašinos programinė įranga suformuoja atskirus failus su tempimo rezultatais kiekvienai medžiagai. Failuose pateikiama didžiausia reikalinga apkrova, bandinio suirimui reikalinga apkrova ir kiti dydžiai reikalingi tolimesniam darbui. Aliuminio 1050 tempimo diagrama nuo įtempių pasiskirstymo pateikiama 2.2 paveikslėlyje.



2.2 pav. Aliuminio 1050 tempimo diagrama

Toliau yra atliekama gautų tempimo diagramų analizė. Pirmiausia diagramoje matomas tiesus ruožas. Šiame ruože galioja Huko dėsnis. Pastebimas tiesinis ryšys tarp įtempių ir deformacijų. Šiame ruože medžiaga yra deformuojama tampriai. Nutraukus bandymą toje vietoje, medžiagos deformuota dalis sugrįžtų į pradinę būseną, buvusią prieš tempimą. Medžiagos liekamasis pailgėjimas lygus nuliui.

Tempimo kreivėje turėtų matytis takumo aikštelės susiformavimo vieta. Tačiau, tempiant aliuminio ruošinį, takumo aikštelė nesusiformavo. Dėl to medžiagos proporcingumo, tamprumo ir takumo ribos nustatomos analitiniu metodu. Proporcingumo ir tamprumo įtempių taškai tempimo diagramoje išsidėsto šalia vienas kito. Dėl to dažnai yra nustatoma tik proporcingumo riba. Liestinės ir įtempių ašies kampo tangentas yra 1,5 karto didesnis už kampo tangenta, kurį sudaro tiesioji tempimo diagramos dalis. Praktiškai buvo išmatuoti kampai ir išskaičiuotas įtempis. Apskaičiuota

proporcingumo riba siekia 98 MPa. Kadangi nesimato aiškios takumo ribos, analitiškai nustatoma sąlyginė takumo riba. Ji apytiksliai lygi įtemimui, kuriam esant pasireiškia 0,2 % liekamoji deformacija. Apskaičiuotoji takumo riba siekia 114 MPa.

Diagramos kreivės kilimas parodo medžiagos sustiprėjimą. Pasibaigus medžiagos tekėjimui, medžiaga pradeda stiprėti. Siekiant nutraukti bandinį, reikia toliau didinti apkrovą. Čia medžiaga deformuojasi tampriai ir plastiškai.

Diagramos kreivės kritimas parodo vietinių deformacijų susiformavimą. Vietinės deformacijos atsiranda pasiekus didžiausią apkrovą, silpniausioje medžiagos vietoje. Skerspjūvio sumažėjimą įtakoja vietinių deformacijų vystymasis. Mažėjant bandinio skerspjūviui, matomas ant ruošinio formuojamas kakliukas. Pasiekus bandinio ruošiniui tokią stadiją, dėl mažėjančio skerspjūvio, medžiagos deformavimui reikalinga apkrova mažėja. Kakliuko skerspjūvis pradeda mažėti greičiau, negu mažėja jėga ir bandinys pasiekęs tam tikrą įtempių ribą nutrūksta.

Pagrindinės medžiagos mechaninės savybės gaunamos, atlikus medžiagos tempimo bandymą:

- Proporcingumo riba – didžiausias įtempis iki kurio deformacijos kinta proporcingai įtempimams;
- Tamprumo riba – didžiausias įtempis iki kurio medžiagoje nepastebimos liekamosios deformacijos;
- Takumo riba – įtempis, kurį pasiekus, bandinio deformacija didėja nedidinant apkrovos;
- Stiprumo riba – didžiausias įtempimas, kurį sukelia pasiekta didžiausia bandinio apkrova.

Medžiagų mechaninės savybės priklauso nuo įvairiausių jas įtakančių veiksnių. Mechaninės savybės priklauso nuo:

- Medžiagos gamybos technologijos;
- Cheminės sudėties;
- Terminio apdirbimo;
- Medžiagos gamybos būdo.

Taip pat didelę įtaką turi medžiagos ar konstrukcinio elemento eksploatavimo sąlygos: agresyvios aplinkos buvimas, temperatūriniai pokyčiai, radioaktyvių dalelių buvimas ir kiti.

Tirti metalo ruošiniai pagaminti iš naujų metalo lakštų paruoštų gamybiniam naudojimui. Naudotos medžiagos nebuvo eksploatuojamos suprojektuotose konstrukcijose. Taigi, bandymams

didžiausią įtaką turi medžiagos gamybos technologija ir gamybos būdas, terminis apdirbimas, cheminė sudėtis. Gautų medžiagų mechaninės charakteristikos pateikiamos 2.1 lentelėje. Tiriamos medžiagos mechaninės charakteristikos pateikiamos 1 Priede.

2.1 lentelė. Medžiagos mechaninės charakteristikos

Medžiaga	Al 1050
Proporcingumo riba, MPa	98
Takumo riba, MPa	114
Stiprumo riba, MPa	124
Nutrūkimo riba, MPa	46

2.2 Frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymai

Frikcinio gręžimo ir sriegimo tyrimo eksperimentinė dalis susideda iš kelių etapų. Visų pirma pagaminamas frikcinio gręžimo įrankis ir kombinuotas įrankis. Sriegimui naudojamas standartinis sriegimo formeris.

Pirmajame etape atliekami bandymai, naudojant frikcinio gręžimo įrankį ir sriegio formerį. Matuojama gręžimo metu atsirandanti ašinė jėga ir momentas sriegio formavimo metu. Antrajame etape atliekami bandymai su kombinuotu įrankiu. Tyrimo metu matuojamos priklausomybės tarp frikcinio gręžimo proceso parametrų (įrankio sukimosi greičio ir pastūmos) ir atsirandančios ašinės jėgos ir momento. Analizuojant atliktus straipsnius buvo pastebėta, kad didžiausią įtaką kiaurymės formavimui turi gręžimo proceso parametrai: sukimosi greitis ir pastūma. Labai svarbu tinkamai suderinti šiuos du parametrus. Kitu atveju, gautas rezultatas netenkins išsikeltų lūkesčių. Suformuotos kiaurymės savybės nustatomos pagal susiformavusias ašines jėgas. Atsižvelgiant į tai, kad skirtingi proceso parametrai nevienodai įtakoja suformuotos kiaurymės kokybę, bandymai atliekami keičiant gręžimo parametrus ir matuojant atsirandančią ašinę jėgą ir momentą. Atlikus bandymus ir atsižvelgus į ašinių jėgų ir momentų skaitines reikšmes, galima išskirti labiausiai tinkančius gręžimo parametrus, kuriems esant suformuojama geriausia kiaurymės forma.

2.2.1 Eksperimentinė įranga ir medžiagos

Tyrimo bandymai atliekami naudojantis Kauno Technologijos Universiteto turima įranga, pagamintais įrankiais ir kitomis reikalingomis pagalbinėmis priemonėmis.

Frikcinio gręžimo bandymams naudotas aliuminis: 1050. Bandymams naudojami 1 mm ir 1,5 mm ruošiniai.

Bandymams atlikti naudotos CNC frezavimo stakles DECKEL MAHO DMU-35M (žr. 2.3 (1) paveikslėlyje) su „Sinumerik 810D/840D“ valdikliu (žr. 2.3 (2) paveikslėlyje). Valdiklyje įdiegta programa „ShopMill“ su kuria sukurtas frikcinio gręžimo programos šablonas.

Frikinio gręžimo-sriegimo metu atsirandanti ašinė jėga matuojama pjezoelektriniu dinamometru Kistler 9345B. Jutiklis Kistler 9345B yra pakankamai standus ir lengvai prikonstruojamas reikiamose vietose. Dinamometras kartu su spaustuvais pritvirtintas prie staklių stalo (žr. 2.3 (3) paveikslėlyje). Dinamometro jautrumas siekia apie 3,7 pC/N, o matavimo ribų diapazonas siekia nuo -10 kN iki 10 kN. Gaunamas silpnas signalas užfiksuojamas naudojant Kistler 5018A laboratorinį stiprintuvą (žr. 2.3 (4) paveikslėlyje). Ašinių jėgų dydis fiksuotas „Picoscope 4024“ osciloskopu (žr. 2.3 (5) paveikslėlyje). Užfiksuotų skaitinių verčių išsaugojimui naudota kompiuterinė įranga su įdiegta „Picoscope 6“ programa (žr. 2.3 (6) paveikslėlyje). Bandymai atlikti su trimis skirtingiems įrankiais: gręžimo, sriegimo ir kombinuotu (žr. 2.3 (7) paveikslėlyje). CNC frezavimo staklių stendo ir naudojamų prietaisų bendras vaizdas pateikiamas 2.3 paveikslėlyje.



2.3 pav. Bandymų darbo stendas

Pirmiausia atliekami bandymai su atskirais įrankiais. Plokštelėje suformuojama kiaurymė naudojant frikinio gręžimo įrankį. Frikinio gręžimo įrankio diametras \varnothing 6.8 mm. Frikinio gręžimo įrankis pateiktas 2.4 paveikslėlyje. Suformavus kiaurymę ruošinyje pakeičiamas įrankis į sriegio formerį. Formeriu suformuojamas sriegis M8. Formerio vaizdas pateikiamas 2.5 paveikslėlyje.

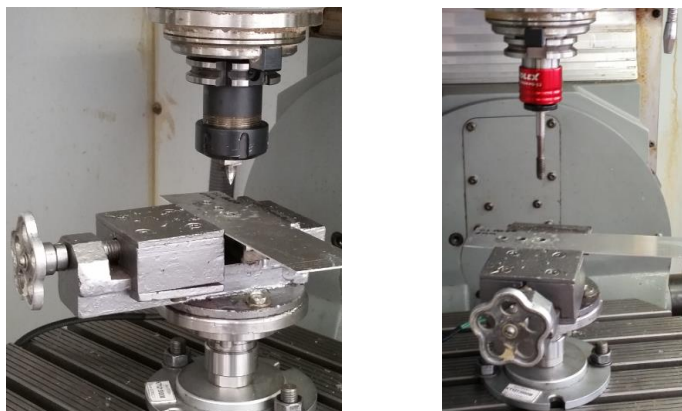


2.4 pav. Frikinio gręžimo įrankis



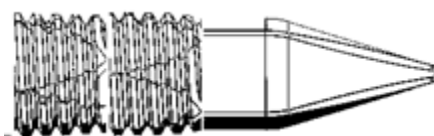
2.5 pav. Formeris M8

Bandymų metu plokštelės suspaudžiamos spaustuvu, kuris pritvirtintas prie staklių stalo. Spaustuvo viduje įmontuotas jutiklis, kuris reaguoja į mažiausius plokštelės deformavimo požymius. Spaustuvo ir naudotų įrankių vaizdas pateikiamas 2.6 paveikslėlyje.



2.6 pav. Bandymų įranga darbo metu

Tolimesniuose eksperimentuose naudojamas kombinuotas įrankis, galintis atlikti gręžimo ir sriegimo operaciją vienu metu. Įrankio konstrukcija pasirinkta, atsižvelgiant į kitų mokslininkų naudotų įrankių konstrukcijas. Įrankis specialiai gamintas, siekiant atlikti frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymus. Įrankis pagamintas iš greitapjūvio plieno. Įrankio konstrukcija sudaryta iš dviejų dalių. Pirmoji įrankio dalis skirta suformuoti metalo ruošinyje $\varnothing 6.8$ mm kiaurymę. Antroji įrankio dalis skirta prasriegti sriegį M8 suformuotoje kiaurymėje. Kombinuoto įrankio vaizdas pateikiamas 2.7 paveikslėlyje.



2.7 pav. Kombinuotas įrankis

2.2.2 Eksperimento rezultatai

Aliuminio lydinys 1050 – labiausiai paplitęs ir plačiausiai technikoje naudojamas metalas. Šis metalas yra pasižymintis geromis mechaninio apdirbimo ir antikorozinėmis savybėmis. Aliuminis lengvai kalamas, valcuojamas, šampuojamas, virinamas kontaktiniu, dujiniu būdu. Aliuminis plačiai naudojamas transporto, gamybos, maisto pramonėje, šaldymo įrenginių gamyboje, laivų statyboje ir kitose pramonės ir ūkio šakose. Pirmiausia atlikti frikcinio gręžimo bandymai su atskirais įrankiais, naudojant frikcinio gręžimo įrankį ir sriegio formerį. Bandymų metu tirtos dviejų storių aliuminio plokštelės. Tirtos 1 ir 1,5 mm storio plokštelės.

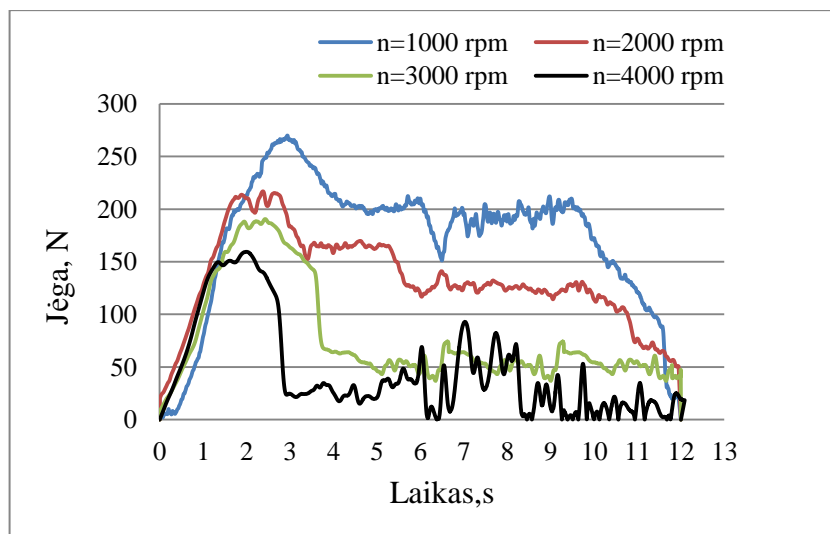
Aluminio lydinio 1050, 1 mm storio ruošinių, jėgos matavimo rezultatai

Bandymų metu matuota frikcinio gręžimo jėga ir momentas. Bandymai atliekami keičiant staklių mechanines charakteristikas. Jėgos ir momentai matuoti keičiant įrankio sukimosi ir įsigilinimo greitį. Sukimosi greičio ir pastūmos parametrai pasirinkti atsižvelgiant į rezultatus, gautus atlikus mokslinės literatūros analizę. Siekiant palyginti gautus rezultatus ir pateikti išvadas, kurie įrankio parametrai tinkamiausi, pasirinktas platesnis keičiamų reikšmių intervalas. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 1000 iki 4000 min⁻¹, o įrankio įsigilinimo greitis nuo 60 iki 140 mm/min.

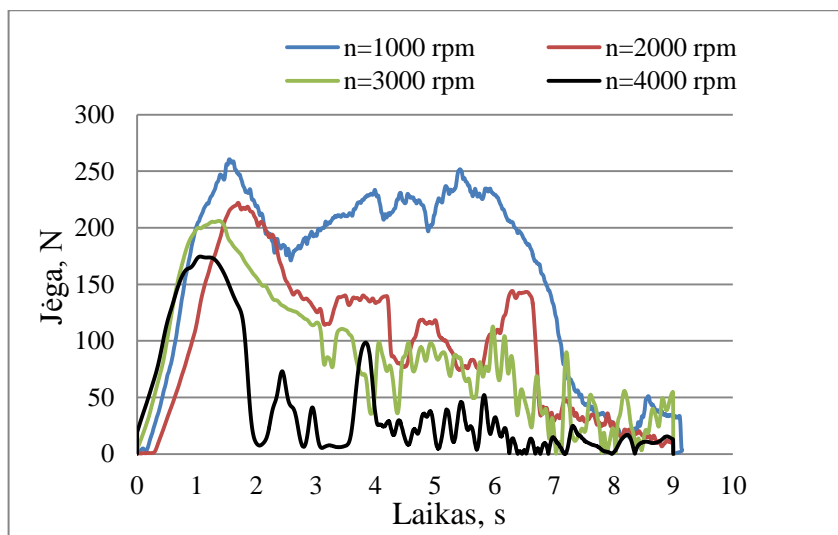
Aluminio gręžimo bandymai ir frikcinio gręžimo jėgos rezultatai pateikiami 2.2 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.8-2.10 paveikslėliuose.

2.2 lentelė. Bandymų rezultatai 1 mm aluminio ruošiniui

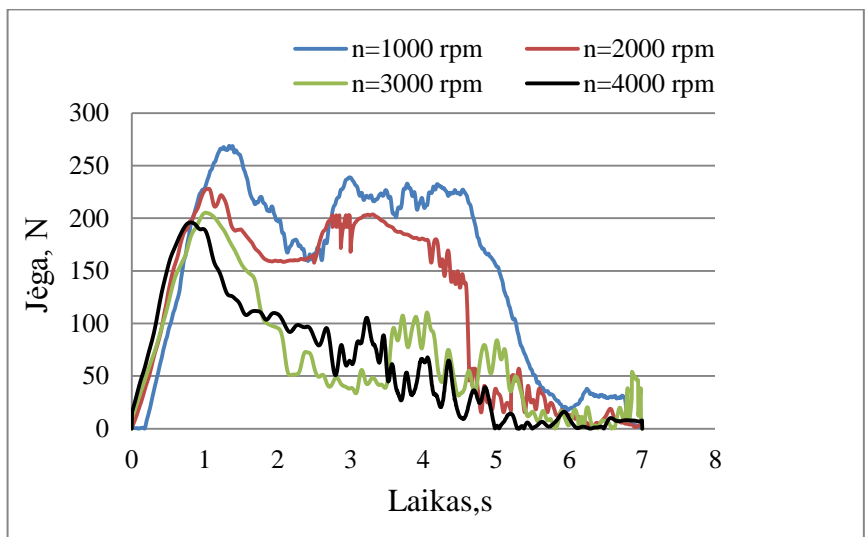
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Sukimosi greitis, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Eksperimentinis laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausia jėga, N
1	AL 1050	1	1000	60	12	13	270
2			1000	100	9	10	260
3			1000	140	7	5.5	268
4			2000	60	12	13	217
5			2000	100	9	10	222
6			2000	140	7	5.5	228
7			3000	60	12	13	193
8			3000	100	9	10	206
9			3000	140	7	5.5	207
10			4000	60	12	13	161
11			4000	100	9	10	178
12			4000	140	7	5.5	197



2.8 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 60 mm/min



2.9 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 100 mm/min



2.10 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 140 mm/min

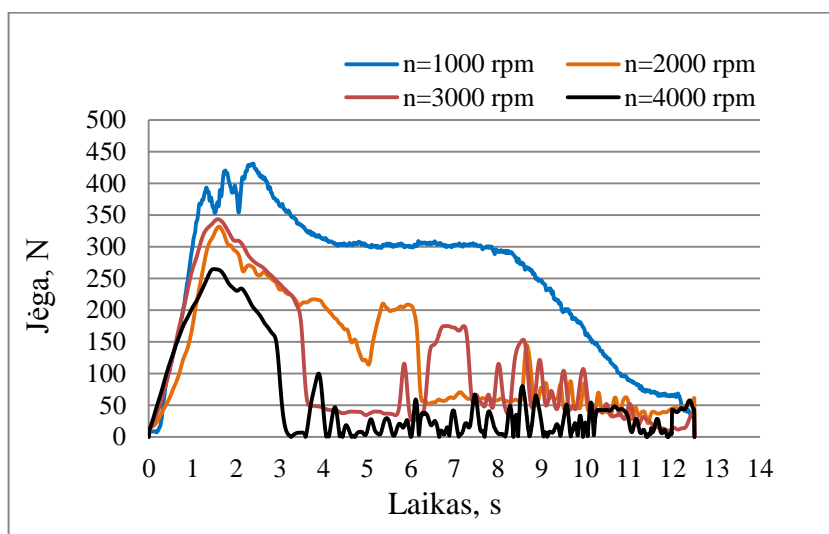
Pateiktuose paveikslėliuose matyti jėgos kitimo grafikai laiko intervale. Laiko intervalas atitinka frikcinio gręžimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys jėgos priklausomybės esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Kiekvienas grafikas vaizduoja jėgos priklausomybę nuo įrankio išigilinimo greičio. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausia jėga formuojant kiaurymę atsiranda įrankiui sukantis mažiausiu 1000 min⁻¹ greičiu. Ašinės jėgos dydis siekia 270 N. Pastebėta tendencija, kad didėjant įrankio išigilinimo greičiui, nepriklausomai nuo sukimosi greičio, ašinės jėgos reikšmė didėja. Įrankiui sukantis didžiausiu 4000 min⁻¹ greičiu, reikalinga mažiausia jėga kiaurymės formavimui. Jėgos dydis siekia 161 N. Taigi, gautos išvados, kad mažiausia ašinė jėga, atsiranda įrankiui sukantis 4000 min⁻¹ greičiu ir esant 60 mm/min įrankio išigilinimo greičiui.

Aluminio lydinio 1050, 1.5 mm storio ruošinių, jėgos matavimo rezultatai

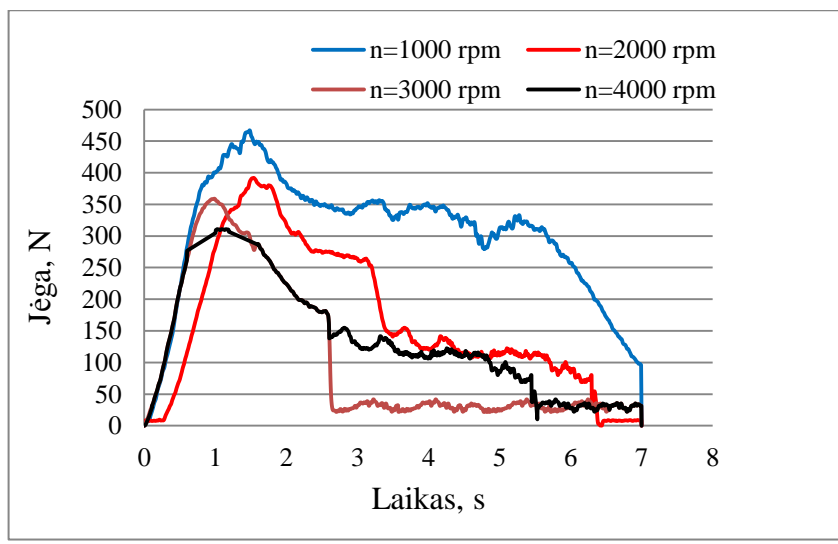
Siekiant patikrinti priimtas prielaidas atlikti bandymai 1,5 mm storio ruošiniams. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 1000 iki 4000 min⁻¹, o įrankio išigilinimo greitis nuo 60 iki 140 mm/min. Eksperimento bandymai ir frikcinio gręžimo jėgos rezultatai pateikiami 2.3 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.11 - 2.13 paveikslėliuose.

2.3 lentelė. Bandymų rezultatai 1.5 mm aliuminio ruošiniui

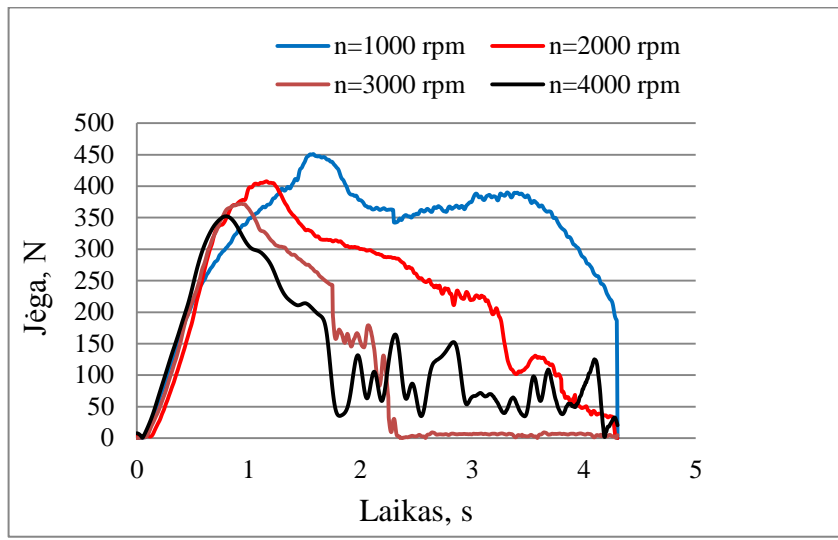
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Sukimosi greitis, min ⁻¹	Išigilinimo greitis, mm/min	Eksperimentinis laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausia jėga, N
1	AL 1050	1.5	1000	60	12.5	14	431
2			1000	100	7	8.75	466
3			1000	140	4.3	6	451
4			2000	60	12.5	14	334
5			2000	100	7	8.75	392
6			2000	140	4.3	6	408
7			3000	60	12.5	14	345
8			3000	100	7	8.75	359
9			3000	140	4.3	6	372
10			4000	60	12.5	14	264
11			4000	100	7	8.75	310
12			4000	140	4.3	6	352



2.11 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 60 mm/min



2.12 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 100 mm/min



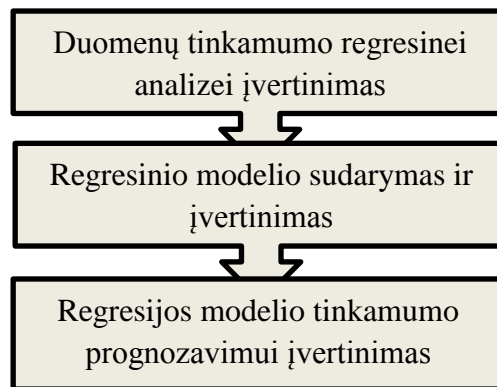
2.13 pav. Gręžimo jėgos kitimo grafikas esant pastoviai pastūmai 140 mm/min

Pateiktuose paveikslėliuose matyti jėgos kitimo grafikai laiko intervale, formuojant kiaurymę 1,5 mm storio plokštelėje. Laiko intervalas atitinka frikcinio gręžimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys jėgos priklausomybės esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Kiekvienas grafikas vaizduoja jėgos priklausomybę nuo įrankio įsigilinimo greičio. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausia jėga formuojant kiaurymę atsiranda įrankiui sukantis 1000 min⁻¹ greičiu. Ašinės jėgos dydis siekia 466 N. Pastebėta tendencija, kad didėjant įrankio įsigilinimo greičiui, nepriklausomai nuo sukimosi greičio, ašinės jėgos reikšmė didėja. Įrankiui sukantis 4000 min⁻¹ greičiu, reikalinga mažesnė jėga, kiaurymės formavimui. Jėgos dydis siekia 264 N. Taigi, mažesnė ašinė jėga, atsiranda įrankiui sukantis 4000 min⁻¹ greičiu ir esant 60 mm/min įrankio įsigilinimo greičiui.

Įvedamų parametų frikcinio gręžimo metu apdorojimas SPSS programa

Atliekant bandymus vyksta procesas, kurio rezultatus įtakoja įvairūs veiksniai (parametrai). Taigi, svarbu juos išanalizuoti ir kiekybiškai įvertinti, nustatant tarp jų egzistuojančias priklausomybes bei jų sąveikos laipsnį (stiprumą) rezultatams.

Frikcinio gręžimo bandymų metu matuotas atsirandančios ašinės jėgos dydis F_A . Bandymai atlikti keičiant du įvesties parametrus: sukimosi greitį n ir įsigilino greitį f . Atsirandanti ašinė jėga yra veikiami įrankio sukimosi greičio n ir įsigilino greičio f . Parametrų įtaka gali būti nustatyta sukuriant kelių kintamųjų regresijos modelį. Parametrų sklaidos analizė ANOVA leidžia sukurti modelį, net kai stebinių imtis yra maža. Regresinė analizė atliekama su statistinių duomenų apdorojimo programa SPSS. Regresinės analizės žingsniai pateikiami 2.14 paveikslėlyje [24].



2.14 pav. Regresinės analizės žingsniai

Svarbu įvertinti duomenų tinkamumą regresinei analizei. Dauguma klasikinių statistinių teiginių galioja, kai atsitiktinis kintamasis yra normalusis arba beveik normalus. Duomenų normalumui preliminariai įvertinti naudojamos histogramos arba kvantilių grafikai, kurie leidžia suvokti skirstinio formą ir nustatyti duomenų atitiktį normalumo reikalavimui. Ši sąlyga yra tenkinama, kai histograma primena varpo formą. 2 priede pateikiami grupuotų duomenų dažnių grafikai. Remiantis grafikais, galima teigti, kad duomenys atitinka normalumo sąlygas, tačiau norint tiksliai įvertinti duomenų normalumą, naudojami įvairūs kriterijai: Kolmogorovo-Smirnovo, Jargue-Bera, Pirsono, Shapiro-Wilk ir k. [24].

Hipotezių formulavimas normalumą tikrinant remiantis kriterijais:

- H_0 : kintamojo reikšmės pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį;
- H_1 : kintamojo reikšmės nepasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį.

Jeigu apskaičiuotoji tikimybė p yra didesnė už pasiklovimo lygmenį $\alpha=0,05$, priimama hipotezė H_0 , tačiau jeigu apskaičiuotoji tikimybė p yra mažesnė už pasiklovimo lygmenį $\alpha=0,05$, priimama hipotezė H_1 [24].

Kai stebinių imtis maža, naudojama Shapiro-Wilk statistika. Jeigu pagal minėtą kriterijų kintamųjų apskaičiuotoji tikimybė (Sig. paskutiniame stulpelyje) yra didesnė už reikšmingumo lygmenį 0,05 vadinasi priimama hipotezė H_0 , t.y. kintamieji yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį. Kaip matyti 2.4 lentelėje, visi kintamieji tenkina normalumo sąlygą [24].

2.4 lentelė. Gręžimo jėgos ir jai įtaką darančių veiksnių duomenų normalumo patikrinimo rezultatai

Normalumo tikrinimas						
	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df.	Sig.	Statistic	df.	Sig.
Įsigilinimo greitis, f	0.213	12	0.139	0.811	12	0.060
Sukimosi greitis, n	0.166	12	0.200	0.876	12	0.078

Sudarant regresijos modelį – svarbu įvertinti ar tarp duomenų yra išskirčių, t.y. išsiaiškinti ar duomenyse yra nereguliarių duomenų arba klaidų. Šiuo atveju, įvertinus stačiakampes diagramas, išskirčių nerasta. Stačiakampės diagramos ir duomenų tinkamumo skaičiavimai pateikiami 3 priede.

Duomenims tinkamas regresijos modelio tipas parenkamas atlikus koreliacinę analizę ir įvertinus koreliacijos koeficiento reikšmingumą. Tarp kintamųjų gali būti tiesinis arba netiesinis ryšys. Tiesinio ryšys yra nustatomas pagal minėtą koreliacijos koeficientą, t.y. jeigu $|r_{xy}|=1$, tai tarp kintamųjų egzistuoja tiesinė priklausomybė; jei $r_{xy}=0$, tai tiesinės priklausomybės nėra; jei $r_{xy}\approx 0$, tai kintamieji nėra susieti tiesine priklausomybe, bet gali būti susieti netiesiniu ryšiu [24].

Tiesinio ryšio (koreliacijos koeficiento) reikšmingumas tikrinamas naudojant t (Stjudento) kriterijų. Hipotezės:

- $H_0: r = 0$;
- $H_1: r \neq 0$.

Jeigu apskaičiuotoji tikimybė p yra didesnė už pasiklovimo lygmenį $\alpha=0,05$, priimama hipotezė H_0 – koreliacijos koeficientas yra artimas 0, vadinasi nėra reikšminio tiesinio ryšio tarp kintamųjų, tačiau gali egzistuoti netiesinis ryšys. 2.5 lentelėje pateikti koreliacijos tarp priklausomojo kintamojo ir nepriklausomų kintamųjų rezultatai.

Analizuojant koreliacijos koeficiento tarp gręžimo jėgos ir įrankio įsigilinimo greičio tikimybę, matyti, kad ji yra mažesnė už pasiklovimo lygmenį $\alpha=0,05$, priimama hipotezė H_1 – galimas reikšminis tiesinis ryšys. Taip pat sukimosi greičio tikimybė yra mažesnė už pasiklovimo lygmenį

$\alpha=0,05$, priimama hipotezė H_1 – galimas reikšminis tiesinis ryšys [24]. Ašinės jėgos ir jai įtaką darančių parametru duomenų koreliacijos skaičiavimai pateikiami 4 priede.

2.5 lentelė. Ašinės jėgos ir jai įtaką darančių parametru duomenų koreliacija

		Sukimosi greitis	Įsigilinimo greitis	Ašinė jėga
Sukimosi greitis	Pearson Correlation	1	0.000	-0.871
	Sig. (2-tailed)		1	0.0001
	N	12	12	12
Įsigilinimo greitis	Pearson Correlation	0.000	1	0.377
	Sig. (2-tailed)	1		0.0227
	N	12	12	12
Ašinė jėga	Pearson Correlation	-0.871	0.377	1
	Sig. (2-tailed)	0.0001	0.0227	
	N	12	12	12

Toliau yra vertinamas tiesinio modelio reikšmingumas. 2.6 lentelėse pateikiami tiesinio modelio reikšmingumo įvertinimo rezultatai. Tiesinio modelio F (Fišerio) tikimybė p yra mažesnė už pasiklivimo lygmenį $\alpha=0,05$, taigi priimama, kad modelis yra reikšminis [24][25]. Tiesinio modelio reikšmingumo skaičiavimai pateikiami 5 priede.

2.6 lentelė. Tiesinio modelio reikšmingumo įvertinimas

	Nestandartiniai koeficientai		Standartiniai koeficientai	t	Sig.	R
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	418.688	23.241		18.015	0.0001	
Sukimosi greitis, n	-0.044	0.005	-.871	-8.325	0.0001	0.949
Įsigilinimo greitis, f	0.653	0.181	0.377	3.599	0.006	

Atlikus regresinę analizę matyti, kad ašinės jėgos dydžiui įtakos turi tiek įrankio įsigilinimo greitis, tiek įrankio sukimosi greitis. Modelio tikslumas yra vertinamas pagal determinacijos koeficientą R^2 , kurio galimos reikšmės $[0;1]$. Jis parodo, kokią procentinę priklausomojo kintamojo kitimo dalį nulemia nepriklausomojo kintamojo kitimas. Kuo R^2 didesnis, tuo regresijos modelis geresnis. Tiesinio regresijos modelio $R^2=0,949$, vadinasi modelio tikslumas – 94,90 proc. Regresinio modelio lygti užrašoma pagal dvimatį tiesinį regresijos modelį, remiantis 2.6 lentelės duomenimis.

Dvimatė tiesinė regresija: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$

čia, y – ašinė jėga (F_A);

b_2 – koeficientas (0.653) ;

b_0 – konstanta (484);

x_1 – sukimosi greitis (n).

b_1 – koeficientas (-0,044) ;

x_2 – įsigilinimo greitis (f).

Tiesinės regresijos modelio lygtis: $F_A = 418.688 - 0.044 \cdot n + 0.653 \cdot f$

Regresinio modelio lygtis leidžia apskaičiuoti ašinę jėgą, atsirandančią frikcinio gręžimo metu. Pagal šį modelį, galima apskaičiuoti frikcinės ašinės jėgos dydį, esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Naudojant regresinę analizę, galima sumažinti laiko ir įrangos nusidėvėjimo

sąnaudas. Siekiant išsiaiškinti ar regresinio modelio lygtis yra tinkama ašinės jėgos skaičiavimams, palyginami tyrimo metu gauti rezultatai ir suskaičiuoti rezultatai, naudojant regresinio modelio lygtį. Gauti rezultatai pateikiami 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė. Gręžimo jėgos dydžių palyginimas

Sukimosi greitis - n, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis- f, mm/min	Ašinė jėgos dydis Bandymų metu - F _A , N	Ašinė jėgos dydis pagal regresinio modelio lygtį, N	Ašinės jėgos skirtumas, N
1000	60	431	440	17.14
1000	100	466	440	26.02
1000	140	451	440	15.1
2000	60	334	396	35.86
2000	100	392	396	3.98
2000	140	408	396	14.1
3000	60	345	352	19.14
3000	100	359	352	7.02
3000	140	372	352	6.1
4000	60	264	308	44
4000	100	310	308	2

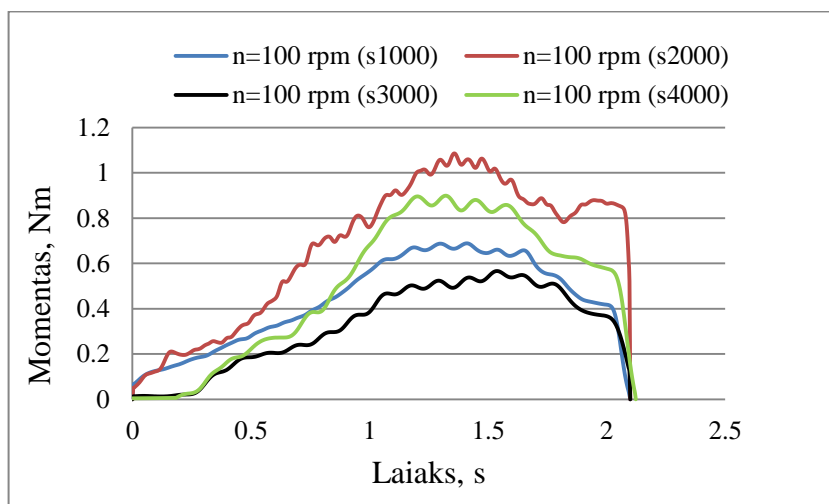
Ašinės jėgos skirtumas nėra didelis. Ašinės jėgos dydis pagal regresinio modelio lygtį skiriasi daugiausiai 44 N, nuo ašinės jėgos dydžio išmatuoto bandymų metu. Jėgos dydžio paklaida gali atsirasti dėl to, kad regresinio modelio tikslumas 94.9 procento, taip pat dėl jėgos matavimo paklaidų bandymų metu. Kadangi rezultatų skirtumas yra nedidelis, regresinio modelio lygtį galima taikyti skaičiuojant ašinės jėgos dydį frikcinio gręžimo metu.

Aliuminio lydinio 1050, 1 mm storio ruošinių, momento matavimo rezultatai

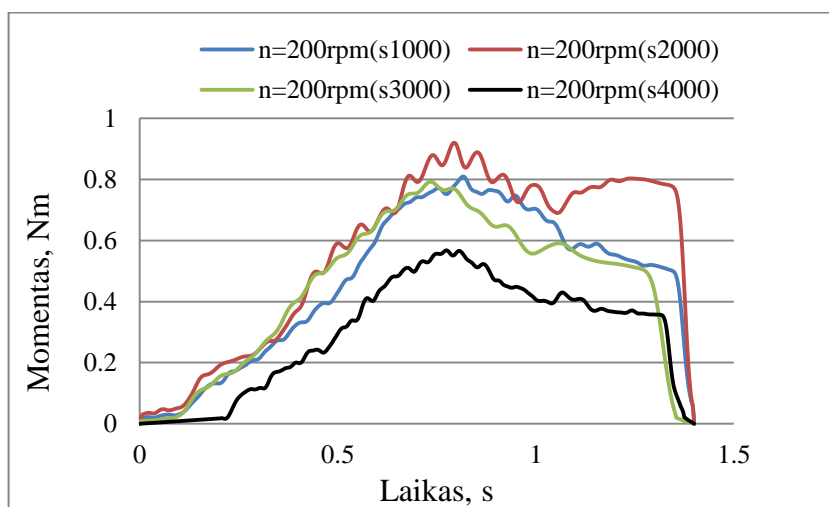
Suformuotoje kiaurymėje formuojamas M8 sriegis. Kiaurymė formuota naudojant sriegio formerį. Bandymų metu matuotas momentas atsirandantis sriegio formavimo metu. Bandymai atlikti keičiant staklių mechanines charakteristikas. Momentai matuoti keičiant įrankio sukimosi greitį, esant skirtingoms kiaurymės gręžimo sąlygoms. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 100 iki 300 min⁻¹, o įrankio įsigilinimo greitis 1,25 mm/ min. Pasirinktas įsigilinimo greitis atitinka sriegio M8 žingsnį. Eksperimento bandymai ir frikcinio gręžimo jėgos rezultatai pateikiami 2.8 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.15-2.17 paveikslėliuose.

2.8 lentelė. Sriegimo bandymų rezultatai 1 mm aliuminio ruošiniui

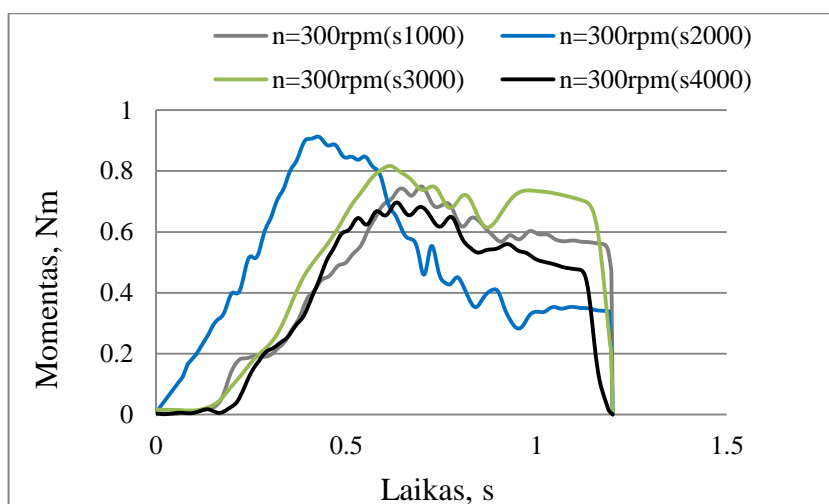
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Kiurymės grežio greitis, min ⁻¹	Sriegimo greitis, min ⁻¹	Įsigilino greitis, mm/min	Ekspirimentinis laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausias momentas, Nm
1	AL 1050	1			1.25	2.1	8.5	0.69
2						1.4	7	0.81
3						1.2	6	0.75
4						2.1	8.5	1.1
5						1.4	7	0.92
6						1.2	6	0.91
7						2.1	8.5	0.57
8						1.4	7	0.79
9						1.2	6	0.82
10						2.1	8.5	0.89
11						1.4	7	0.57
12						1.2	6	0.69



2.15 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 100 min⁻¹



2.16 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 200 min⁻¹



2.17 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 300 min^{-1}

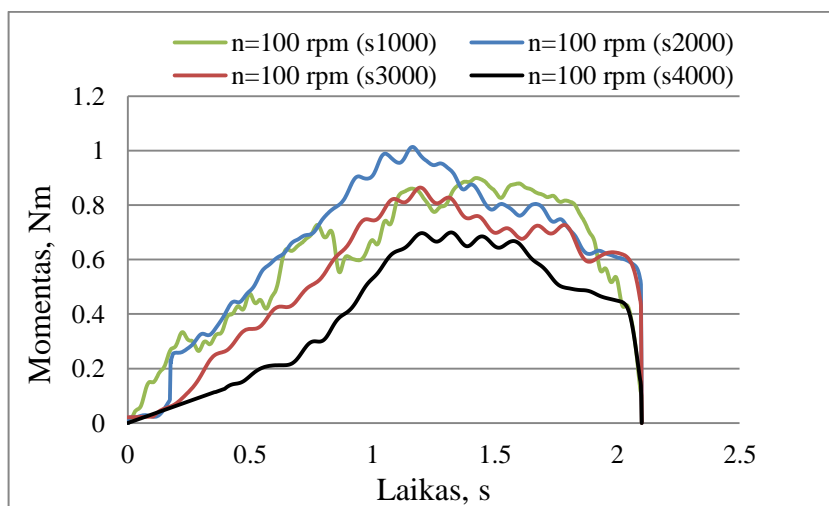
Pateiktuose paveikslėliuose matyti sriegimo momento kitimo grafikai laiko intervale, formuojant sriegį 1 mm storio plokštelėje. Laiko intervalas atitinka sriegimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys sriegimo momento priklausomybės, esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Kiekvienas grafikas vaizduoja sriegimo momento priklausomybę nuo įrankio sukimosi greičio, esant skirtingoms kiaurymės formavimo sąlygoms. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausias momentas atsiranda įrankiui sukantis 100 min^{-1} greičiu, kai kiaurymė suformuota 2000 min^{-1} greičiu. Sriegimo momento dydis siekia 1,1 Nm. Padarytos išvados, kad formerio sukimosi greitis, turi nedidelę įtaką sriegimo momento dydžiui. Įrankiui sukantis 100, 200 ar 300 min^{-1} greičiu sriegimo momentas nežymiai kinta. Pastebėta sriegimo momento priklausomybė nuo kiaurymės gręžimo parametrų. Sriegiant sriegį kiaurymėse, kurios gręžtos didesniu gręžimo įrankio greičiu, gaunamas mažesnis sriegimo momentas.

Aluminio lydinio 1050, 1.5 mm storio ruošinių, momento matavimo rezultatai

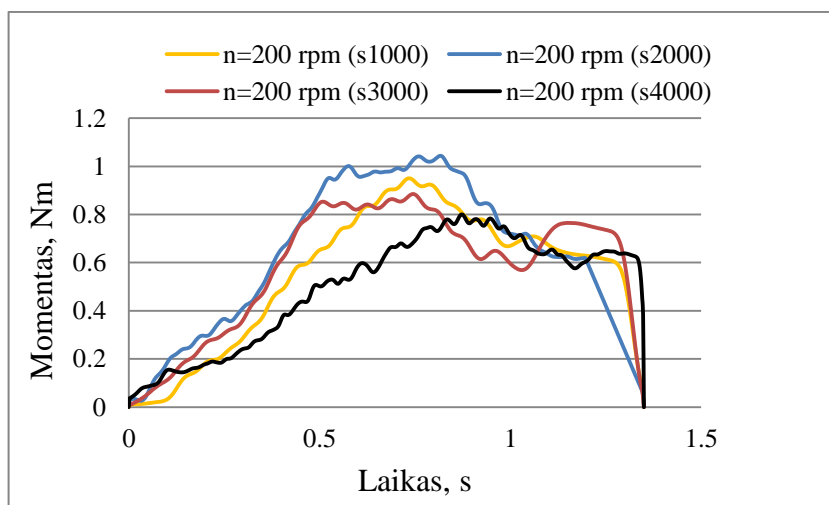
Siekiant patikrinti priimtas prielaidas, atlikti bandymai 1,5 mm storio ruošiniams. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 100 iki 300 min^{-1} , o įrankio įsigilinimo greitis $1,25 \text{ mm/min}$. Eksperimento bandymai ir sriegimo momentų rezultatai pateikiami 2.9 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.18-2.20 paveikslėliuose.

2.9 lentelė. Sriegimo bandymų rezultatai 1,5 mm aliuminio ruošiniui

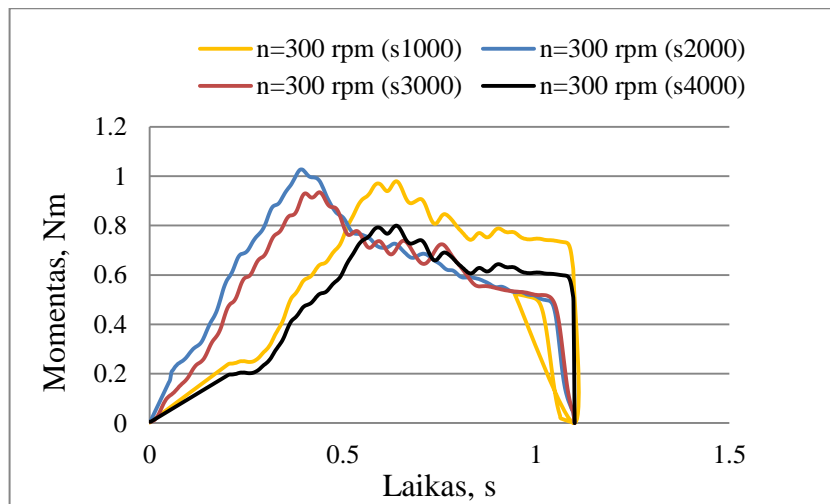
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Kiaurymės gręžimo greitis, min ⁻¹	Sriegimo greitis, min ⁻¹	Išigilinimo greitis, mm/min	Ekspirimentinis laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausias momentas, Nm
1	AL 1050	1.5			1.25	100	9	0.89
2						200	7.5	0.95
3						300	6.5	0.98
4						100	9	1.01
5						200	7.5	1.04
6						300	6.5	1.02
7						100	9	0.86
8						200	7.5	0.89
9						300	6.5	0.94
10						100	9	0.69
11						200	7.5	0.8
12						300	6.5	0.79



2.18 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 100 min⁻¹



2.19 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 200 min⁻¹



2.20 pav. Sriegimo momento kitimo grafikas esant sriegimo greičiui 300 min⁻¹

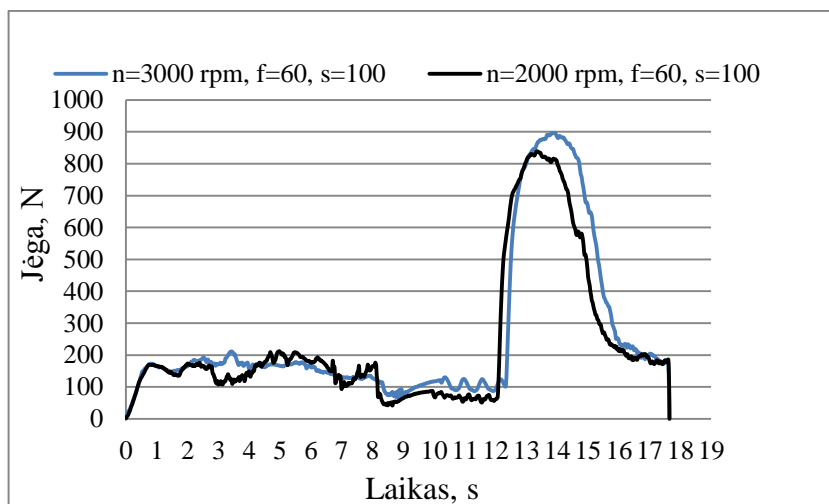
Pateiktuose paveikslėliuose matyti sriegimo momento kitimo grafikai laiko intervale, formuojant sriegį 1,5 mm storio plokštelėje. Laiko intervalas atitinka sriegimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys sriegimo momento priklausomybės, esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Kiekvienas grafikas vaizduoja sriegimo momento priklausomybę nuo įrankio sukimosi greičio, esant skirtingoms kiaurymės formavimo sąlygoms. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausias momentas atsiranda įrankiui sukantis 200 min⁻¹ greičiu, kai kiaurymė suformuota 2000 min⁻¹ greičiu. Sriegimo momento dydis siekia 1,04 Nm. Padarytos išvados, kad formerio sukimosi greitis turi nedidelę įtaką sriegimo momento dydžiui. Įrankiui sukantis 100, 200 ar 300 min⁻¹ greičiu sriegimo momentas nežymiai kinta. Tačiau pastebėta sriegimo momento priklausomybė nuo kiaurymės gręžimo parametrų. Sriegiant sriegį kiaurymėse, kurios gręžtos didesniu gręžimo įrankio greičiu, gaunamas mažesnis sriegimo momentas.

Aliuminio lydinio 1050, 1.5 mm storio ruošinių, jėgos matavimo rezultatai kombinuotu įrankiu

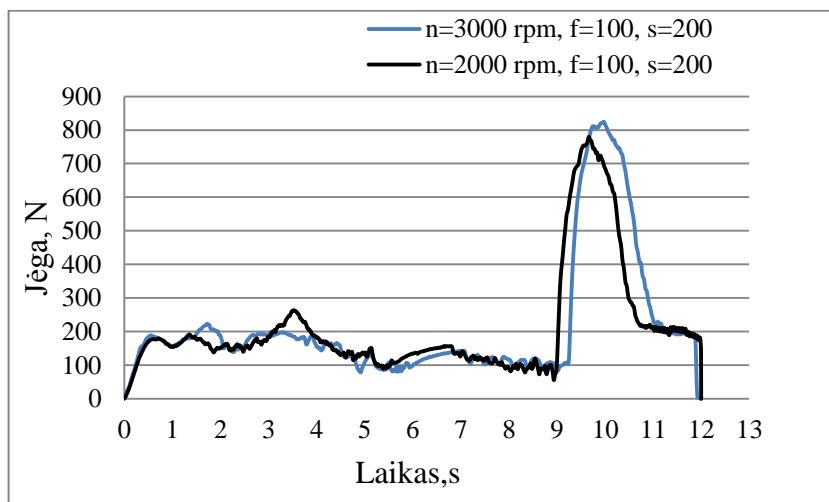
Bandymuose naudotos 1,5 mm storio aliuminio plokštelės. Bandymų metu matuota atsirandanti ašinė jėga ir sukimosi momentas. Jėgos ir momentai matuoti keičiant įrankio sukimosi ir įsigilinimo greitį. Sukimosi greičio ir pastūmos parametrai pasirinkti pagal ankstesnius bandymus su atskirais įrankiais. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 2000 iki 3000 min⁻¹, įrankio įsigilinimo greitis nuo 60 iki 140 mm/min, įrankio sriegimo greitis nuo 100 iki 200 min⁻¹. Eksperimento bandymų rezultatai pateikiami 2.10 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.21 - 2.23 paveikslėliuose. Naudota gręžimo programa pateikiama 6 priede.

2.10 lentelė. Kombinuoto įrankio bandymų rezultatai 1,5 mm aliuminio ruošiniui

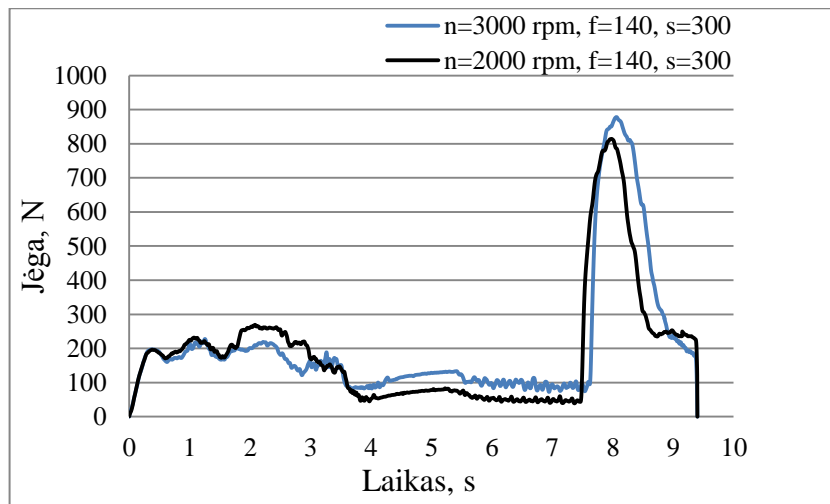
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Kiaurymės gręžimo greitis, min ⁻¹	Sriegimo greitis, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Bandymų laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausia jėga, N
1			2000	100	60	17,65	19,5	839
2			2000	200	100	12	15	779
3	1050	1,5	2000	300	140	9,4	11,5	814
4			3000	100	60	17,65	19,5	897
5			3000	200	100	12	15	824
6			3000	300	140	9,4	11,5	878



2.21 pav. Ašinės jėgos kitimo grafikas įrankiui gilinantis 60 mm/min ir sriegiant 100 min⁻¹ greičiu



2.22 pav. Ašinės jėgos kitimo grafikas įrankiui gilinantis 100 mm/min ir sriegiant 200 min⁻¹ greičiu



2.23 pav. Ašinės jėgos kitimo grafikas įrankiui gilinantis 140 mm/min ir sriegiant 300 min⁻¹ greičiu

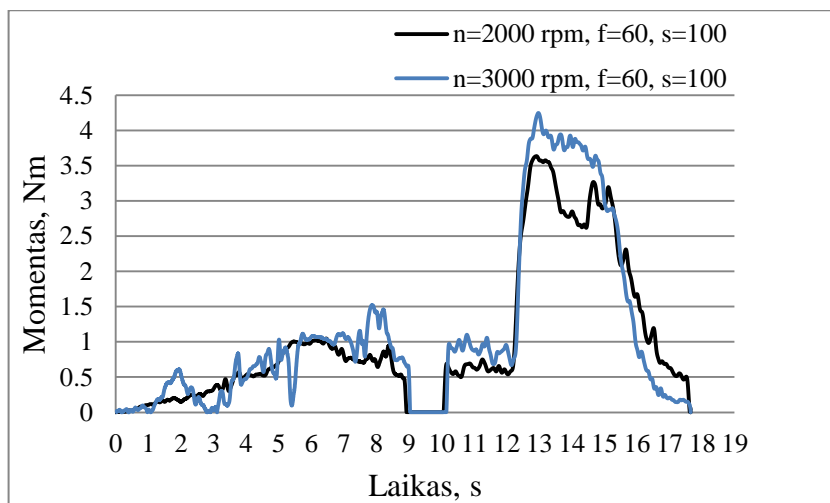
Pateiktuose paveikslėliuose matyti jėgos kitimo grafikai laiko intervale, formuojant kiaurymę ir sriegį 1,5 mm storio plokštelėje. Laiko intervalas atitinka frikcinio gręžimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys jėgos priklausomybės, esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausia jėga formuojant kiaurymę atsiranda įrankiui sukantis 3000 min⁻¹ greičiu. Ašinės jėgos dydis siekia 897 N. Išanalizavus gautus jėgų grafikus padaryta išvada, kad nėra išsiskiriančio parametro, kuris labiausiai įtakotų gautus rezultatus. Ašinės jėgos dydis visų bandymų metu, esant skirtingiems gręžimo parametrams, kinta laiko intervale nepriklausomai nuo keičiamų parametrų reikšmių. Padaryta išvada, kas visi įvedami parametrai įtakoja jėgos dydį

Aliuminio 1050, 1.5 mm storio ruošinių, momento matavimo rezultatai kombinuotu įrankiu

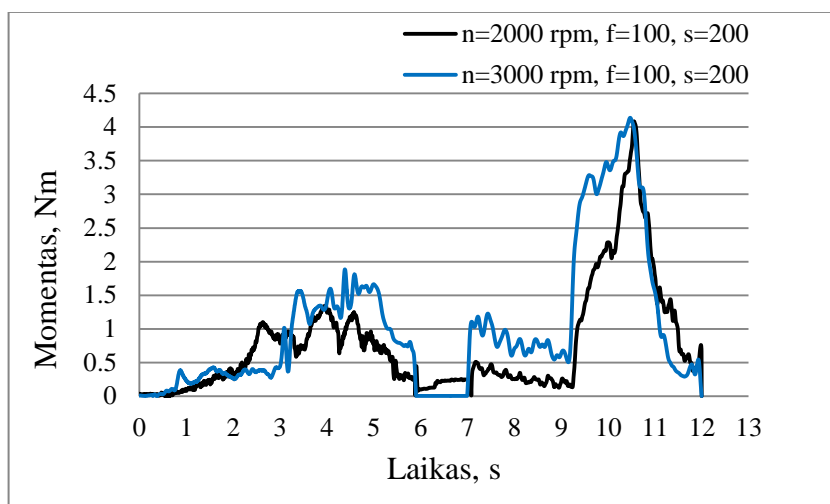
Atliekant bandymus su kombinuotu įrankiu, matuotos sukimosi momento reikšmės. Bandymai atlikti keičiant staklių mechanines charakteristikas. Įrankio sukimosi greitis keičiamas nuo 2000 iki 3000 min⁻¹, įrankio įsigilinimo greitis nuo 60 iki 140 mm/min, įrankio sriegimo greitis nuo 100 iki 200 min⁻¹. Eksperimento bandymų rezultatai pateikiami 2.11 lentelėje. Gauti rezultatų grafikai pateikiami 2.24 - 2.26 paveikslėliuose.

2.11 lentelė. Kombinuoto įrankio bandymų rezultatai 1,5 mm aliuminio ruošiniui

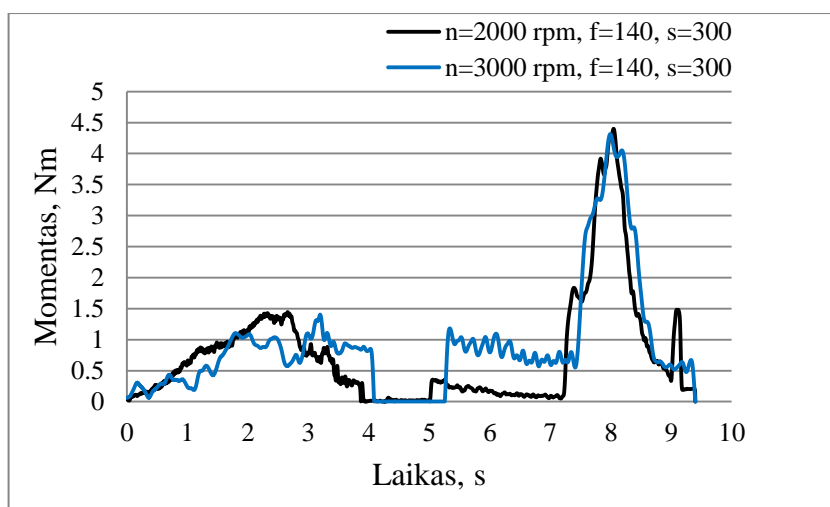
Eil. Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Kiaurymės gręžimo greitis, min ⁻¹	Sriegimo greitis, min ⁻¹	Įsigilinimo greitis, mm/min	Bandymų laikas, s	Išmatuotas laikas, s	Didžiausias momentas, Nm
1			2000	100	60	17,65	19.5	3,64
2			2000	200	100	12	15	4,08
3	1050	1,5	2000	300	140	9,4	11.5	4,39
4			3000	100	60	17,65	19.5	4,24
5			3000	200	100	12	15	4,13
6			3000	300	140	9,4	11.5	4,31



2.24 pav. Momento kitimo grafikas įrankiui gilinantis 60 mm/min ir sriegiant 100 min⁻¹ greičiu



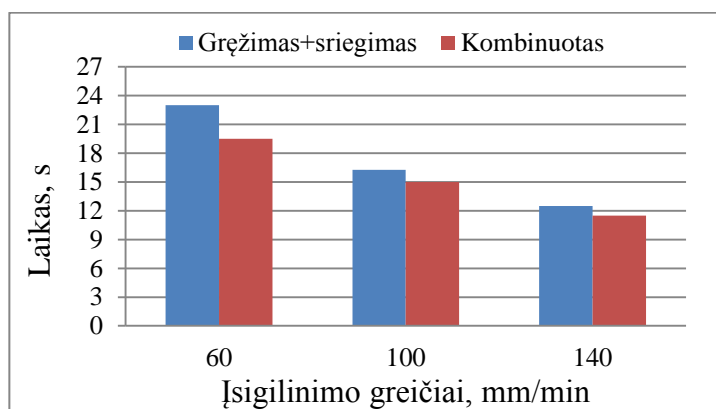
2.25 pav. Momento kitimo grafikas įrankiui gilinantis 100 mm/min ir sriegiant 200 min⁻¹ greičiu



2.26 pav. Momento kitimo grafikas įrankiui gilinantis 140 mm/min ir sriegiant 300 min⁻¹ greičiu

Pateiktuose paveikslėliuose matyti momento kitimo grafikai laiko intervale, formuojant kiaurymę ir sriegį 1,5 mm storio plokštelėje. Laiko intervalas atitinka frikcinio gręžimo laiką bandymų metu. Pateikiamos trys jėgos priklausomybės esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams. Išanalizavus gautus rezultatus matyti, kad didžiausias momentas formuojant kiaurymę atsiranda įrankiui sukantis 2000 min^{-1} greičiu. Momento dydis siekia 4,39 Nm. Išanalizavus gautus jėgų grafikus padaryta išvada, kad nėra išsiskiriančio parametro, kuris labiausiai įtakotų gautus rezultatus. Momento dydis visų bandymo metu, esant skirtingiems gręžimo parametrams, kinta laiko intervale nepriklausomai nuo keičiamų parametrų reikšmių. Padaryta išvada, kas visi įvedami parametrai įtakoja momento dydį.

Bandymų metu išmatuotas laikas reikalingas kiaurymei pragręžti ir joje suformuoti sriegį. Laikas matuotas atliekant bandymus tiek su atskirais įrankiais, tiek su kombinuotu įrankiu. Lyginamas išmatuotas laikas atliekant bandymus 1,5 mm plokštelei. Įrankio sukimosi greitis 2000 min^{-1} , įrankio įsigilinimo greitis kinta nuo 60 iki 140 mm/min. Laiko palyginimo grafikas pateiktas 2.27 paveikslėlyje.



2.27 pav. Matuoti laikai bandymų metu

Pateiktame paveikslėlyje matyti kombinuoto ir atskirų įrankių laiko palyginimo diagramos. Pradinis laikas fiksuotas įrankiui palietus plokštelę. Galinis laikas fiksuotas įrankiui pasišalinus iš ruošinio. Atliekant bandymus su kombinuotu įrankiu reikia mažiau laiko suformuoti kiaurymę. Kombinuoto ir atskirų įrankių bendras laikas nežymiai skiriasi. Tačiau bandymų metu nebuvo įvertintas laiko intervalas reikalingas pasikeisti gręžimo įrankiui į formerį. Įrankių pasikeitimas trunka keletą sekundžių, kas prailgina kiaurymės formavimo procesą. Taigi, kombinuotu įrankiu kiaurymė suformuojama greičiau nei tai darant atskirais įrankiais.

Bandymų metu naudotos 1 mm ir 1,5 mm storio plokštelės. Plokštelėse suformuotas M8 sriegis. Suformuoti M8 sriegiai matomi 2.28 paveikslėlyje. Čia, n – įrankio gręžimo greitis (min^{-1}), f – įrankio įsigilinimo greitis (mm/min), s – įrankio sriegimo greitis (min^{-1}).



n 4000 n 4000 n 4000
f 140 f 100 f 60
s 100 s 200 s 300



n 4000 n 4000 n 4000
f 60 f 100 f 140
s 100 s 200 s 300



n 1000 n 1000 n 1000
f 140 f 100 f 60
s 100 s 200 s 300

2.28 pav. Gautos kiaurymės su M8 sriegiu, frikcinio gręžimo metu

2.3 Eksperimentinės dalies išvados

Šioje dalyje atlikti eksperimentiniai bandymai pasirinktam aliuminio lydiniui Al 1050. Pirmiausia atlikti ruošinio tempimo bandymai, siekiant nustatyti medžiagos mechanines charakteristikas. Atlikus tempimo bandymus, nustatytos tiriamos medžiagos mechaninės charakteristikos. Nustatytos charakteristikos atitinka teorines medžiagos savybes randamas žinyuose ir medžiagos sertifikatuose. Dėl to galima teigti, kad tempimo bandymai buvo atlikti tinkamai ir pakankamai tiksliai.

Toliau aprašoma įranga ir prietaisai naudojami frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymuose. Trumpai apibūdinami naudoti įrankiai ir darbų stendas. Frikcinio gręžimo ir sriegimo metu atlikti bandymai naudojant atskirus įrankius ir kombinuotą įrankį. Atliekami bandymai formuojant M8 sriegį aliuminio ruošiniuose. Bandymų metu tirtos 1 ir 1.5 mm aliuminio plokštelės. Bandymų metu matuota atsirandanti ašinė jėga ir sukimosi momentas. Išanalizavus gautus duomenis pastebėta, kad įrankiui sukantis didesniu sukimosi greičiu, reikalinga mažesnė ašinė jėga ir sukimosi momentas. Įrankio įsigilinimo greitis turi nedidelę įtaką matuojamų reikšmių kitimui. Ši prielaida patvirtino atliekant bandymus 1 ir 1.5 mm aliuminio ruošiniams. Įrankiui sukantis didžiausiu 4000 min⁻¹ greičiu, reikalinga mažiausia ašinė jėga ir sukimosi momentas. Mažiausias ašinės jėgos dydis 1 mm ruošiniui siekia 161 N, 1.5 mm ruošiniui 264 N. Mažiausia sukimosi momento reikšmė 1 mm ruošiniui siekia 0.57 Nm, 1.5 mm ruošiniui 0.69 Nm.

Atlikta duomenų regresinė analizė. Regresinė analizė atlikta su statistinių duomenų apdorojimo programa SPSS. Nustatyta analizuotų parametrų įtaka ašinės jėgos dydžiui. Sukurta regresinio modelio lygtis. Apskaičiuotas modelio tikslumas, siekiantis 94,9 procento. Gauta tiesinės regresijos modelio lygtis: $F_A = 418.688 - 0.044 \cdot n + 0.653 \cdot f$. Pagal lygtį galima apskaičiuoti jėgos

dydžio reikšmę, esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams. Lygtis yra pakankamai tiksli ir tenkina rezultatus.

Toliau atlikti frikcinio gręžimo bandymai su kombinuotu įrankiu. Bandymų metu matuotos ašinės jėgos ir sukimosi momento reikšmės. Išanalizavus gautus duomenis pastebėta, kad ašinės jėgos ir sukimosi momento reikšmės nepriklausomai nuo keičiamų įrankio parametrų mažai kinta. Tai reiškia, kad parinkti įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiai vienodai įtakoja ašinės jėgos ir momento dydį. Mažiausia ašinė jėga 779 N, išmatuota įrankiu sukantis 2000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 100 mm/min greičiu. Mažiausias momentas išmatuotas 3.64 Nm, įrankiui sukantis 2000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 60 mm/min greičiu. Didžiausią įtaką ašinės jėgos ir momento dydžiui turi kiaurymės gręžimo perėjimo laikas į sriegimą. Labai svarbu suderinti laiką ir momentą, kada įrankis turi baigti formuoti kiaurymę ir pradėti sriegti sriegį. Netinkamu laiku nutraukus gręžimą, suformuojama per maža kiaurymė, o tai įtakoja didelį sriegimo momentą ir ašinę jėgą perėjimo metu. Ypatingai svarbu pasigaminti tinkamos geometrijos frikcinio gręžimo įrankį. Galima teigti, kad įrankio forma ir konstrukciniai sprendimai turės didžiausią įtaką matuojamų reikšmių dydžiui. Taip pat tinkamai suderinta gręžimo programa.

Pateikiamas laikų palyginimas reikalingas kiaurymės suformavimui su atskirais įrankiais ir kombinuotu. Pateikta laiko palyginimo diagrama. Palyginus duomenis matyti, kad atliekant bandymus su kombinuotu įrankiu reikalingos mažesnės laiko sąnaudos. Kiaurymė suformuojama 1.1 karto greičiau nei su atskirais įrankiais. Pranašumas santykinai nėra didelis. Tačiau čia matuotas laikas tik gręžimo ir sriegimo metu. Neįvertinta, kad atliekant bandymus su atskirais įrankiais reikalingas papildomas laikas įrankių pasikeitimui. Galima teigti, kad kiaurymės ir sriegio formavimas kombinuotu įrankiu yra efektyvesnis.

3. MODELIAVIMAS

3.1 Modeliavimo samprata

Modeliuojami matematiniai sistemų ir procesų modeliai yra realios sistemos atvaizdas, skirtas įvairiems taikomiesiems uždaviniams spręsti. Ne visada modeliavimo eigoje pavyksta atkurti pakankamai realias sąlygas. Tačiau net apytiksliai sistemų modeliai dažnai tampa pakankamai vaizdūs ir parankūs, projektuojant naujas technologijas ar siekiant iširti tam tikros pasirinktos ar kuriamos sistemos funkcionalumą eksploataavimo sąlygomis. Kartais tokius realius tyrimus yra pavojinga ir rizikinga atlikti, esant realioms sąlygoms. Taip pat tokiems bandymams reikia skirti daug laiko ir finansų. Todėl labai patogu ir efektyvu kurti įvairius matematinius modelius. Modeliais galima tirti naudojamų ar naujų sistemų atsaką į įvairius trikdžius, tirti procesų ir sistemų dinamiką ir kinematiką.

Dažniausiai naudojami matematiniai modeliai:

- Moksliniams tyrimams ir technologijoms kurti;
- Sistemų ir procesų valdymo operatoriams mokytis. Tinkamai parengus vartotojo sąsajas, sukuriama aplinka vaizduojanti realią tikrovę ir leidžianti operatoriams mokytis ir tobulėti;
- Planuoti ir sudaryti procesų valdymo grafikus;
- Optimizuoti. Nustatyti optimalios proceso vykdymo sąlygas ir režimus;
- Procesų eigai prognozuoti ir procesams valdyti [17].

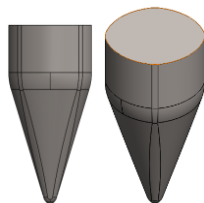
Šių dienų produktų modeliavimas atliekamas inžinerinių grupių, naudojant skirtingų gamintojų įvairius simuliacijos įrankius. Naudojant skirtingų gamintojų įvairias simuliacines programas, sunaudojama daug laiko ir piniginių resursų. Taip pat prarandamas darbo efektyvumas, nuolat keičiant modeliavimo aplinkas. SIMULIA pateikia visą paketą skirtingų analizės produktų, kurie leidžia visiems vartotojams, neatsižvelgiant į jų modeliavimo patirtį ir įgūdžius, bendradarbiauti ir sklandžiai dalintis modeliavimo duomenis su kitais vartotojais, neprarandant svarbios modelio informacijos ir modeliavimo eigos. Vienas iš tokių modeliavimo paketų – Abaqus.

Abaqus modeliavimo paketas siūlo galingą ir apimantį įvairius inžinerinius sprendimus modeliavimo paketą. Šis paketas apima ir įprastinius, ir sudėtingus inžinerinių problemų sprendimus. Pritaikomas įvairiose gamybos pramonės šakose ir mokslo srityse. Garsiausios pasaulio kompanijos naudoja Abaqus paketo privalumais, siekiant sustiprinti procesus, sumažinti išlaidas, padidinti veiksmingumą ir įgyti konkurencinį pranašumą.

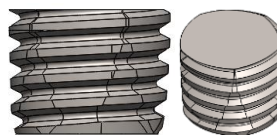
Atsižvelgiant į privalumus, pritaikomumą bei tikslus, skaičiavimo modeliavimo darbai šiame darbe atlikti su specialia inžinerine analizės programa – Abaqus [18].

3.2 Modelių kūrimas

Modeliavimo darbuose siekiant supaprastinti modelį ir palengvinti darbo procesą, sumodeliuoti du atskiri įrankiai. Įrankiai modeliuoti 3D modeliavimo programa: SolidWorks. Įrankio skirto kiaurymės formavimui eskizas pateikiamas 3.1 paveikslėlyje. Įrankio skirto sriegio formavimui eskizas pateikiamas 3.2 paveikslėlyje. Įrankių brėžiniai pateikiami 7 priede.

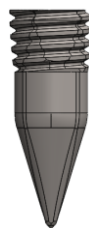


3.1 pav. Gręžimo įrankis



3.2 pav. Sriegimo įrankis

Siekiant atlikti realius frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymus, reikalingas specialus įrankis. Bandymai buvo atlikti su kombinuotu įrankiu, kuris atliko gręžimo ir sriegimo operaciją. Galima įrankio forma ir geometrija pateikiama 3.3 paveikslėlyje.



3.3 pav. Kombinuotas įrankis

3.3 Skaičiavimo modelis

Frikcinio gręžimo ir sriegimo modeliavimo metu įvertinami kietųjų kūnų ryšiai, įrankio ir plokštelės kontakto taškai, terminės medžiagų savybės. Frikcinio gręžimo metu, esant plastinėms deformacijoms ir gręžimo įrankio bei medžiagos kontakto vietoje atsirandančiai trinčiai, generuojama šiluma. Didžioji dalis generuojamos šilumos atsiranda dėl atsirandančios trinties tarp įrankio ir gręžiamos medžiagos [19].

Frikcinio gręžimo metu susidaręs šiluminis poveikis turi didelę įtaką tiriamos medžiagos mechaninėms savybėms. Modeliuojant gręžimo modelį, būtina įvertinti generuojamos šilumos poveikį tiriamajai medžiagai. Medžiagos elgsena, esant kintančiai temperatūrai, aprašoma naudojant Johnson Cook modelį. Naudojant Johnson Cook modelį nustatoma medžiagos elgsena į atsirandančius temperatūrinius pokyčius ir deformacijas. Frikcinio gręžimo modelyje pasirenkama Al 1050 medžiaga, kuriai nustatyti Johnson Cook parametrai. Aliuminio 1050 mechaninės savybės pateikiamos 3.1 lentelėje. Aliuminio 1050 Johnson Cook medžiagos konstantos pateikiamos 3.2 lentelėje [20] [21].

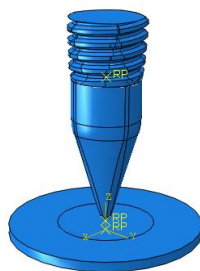
3.1 lentelė. Mechaninės Aliuminio 1050 savybės

Tankis (kg/m^3)	Jungo modulis (G Pa)	Puasono koeficientas
2710	71	0,33

3.2 lentelė. Aliuminio 1050 medžiagos „Johnson-Cook“ parametrai [21]

A (M Pa)	B (M Pa)	n	c	m	T_m (K)	C_p (J/kgK)
110	150	0,360	0,014	1	918,15	899

Frikinio gręžimo ir sriegimo modelis supaprastinamas iki paprasčiausios konstrukcijos. Modelio supaprastinimas leidžia sutaupyti skaičiavimo resursus. Įrankio parametrai palikti tokie patys kaip ir naudoto įrankio eksperimento metu. Modelio vaizdas matomas 3.4 paveikslėlyje. Kombinuoto įrankio geometrija pateikiama 8 priede.

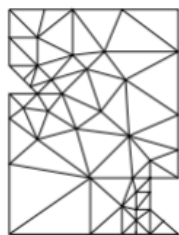


3.4 pav. Modelio erdvinis vaizdas

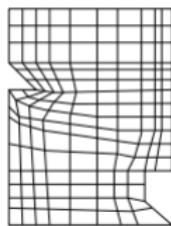
Frikinio gręžimo – sriegimo modelyje vaizduojama tik dalis naudoto ruošinio. Naudojamas minimalaus skersmens plokštelės modelis, taupant skaičiavimo resursus.

Frikinio gręžimo-sriegimo modelis aprašomas Abaqus programoje. Priskiriami įrankio parametrai ir medžiagos savybės. Parenkama plokštelės medžiaga Al 1050, aprašant medžiagos parametrus. Įvertinami įrankio ir plokštelės kontaktai. Priskiriamas baigtinių elementų tinklelio tipas.

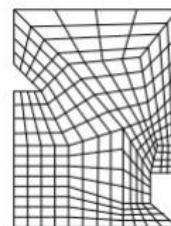
Galimi keli baigtinių elementų tinklelio tipai: nestruktūrinis, struktūrinis ir mišrusis. Nestruktūrinis tinklelis yra toks, kurio vidinės viršūnės nėra topologiškai panašios su šalia esančiomis viršūnėmis 3.5 paveikslėlis (a). Struktūrinis baigtinių elementų tinklelis yra tinklelis, kurio vidinės viršūnės yra topologiškai panašios 3.5 paveikslėlis (b). Mišrus baigtinių elementų tinklelis turi struktūrinio tinklelio sritis nestruktūriniame tinklelyje 3.5 paveikslėlis (c) [22][23].



a) Nestruktūrinis



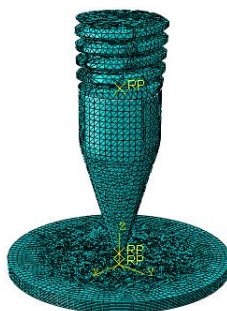
b) Struktūrinis



c) Mišrusis

3.5 pav. Baigtinių elementų tinklelio tipai

Tinkleliai taip pat klasifikuojami pagal juos sudarančių baigtinių elementų formą. Struktūriniame tinkleliui naudojamas heksaedro formos baigtinis elementas. Heksaedro formos baigtiniais elementais suskaidoma plokštelė. Su šiuo modeliu gaunami geresni ir tikslesni rezultatai. Nestruktūriniame tinkleliui naudojamas tetraedro formos baigtinis elementas. Kombinuoto įrankio gręžimo ir sriegimo dalis suskaidomas į tetraedrinės formos baigtinius elementus. Su šiuo modeliu yra geriau atkartojama sudėtinga įrankio forma. Įkeltas modelis suskaidomas į skirtingus baigtinius elementus. Modelio vaizdas pateikiamas 3.6 paveikslėlyje.



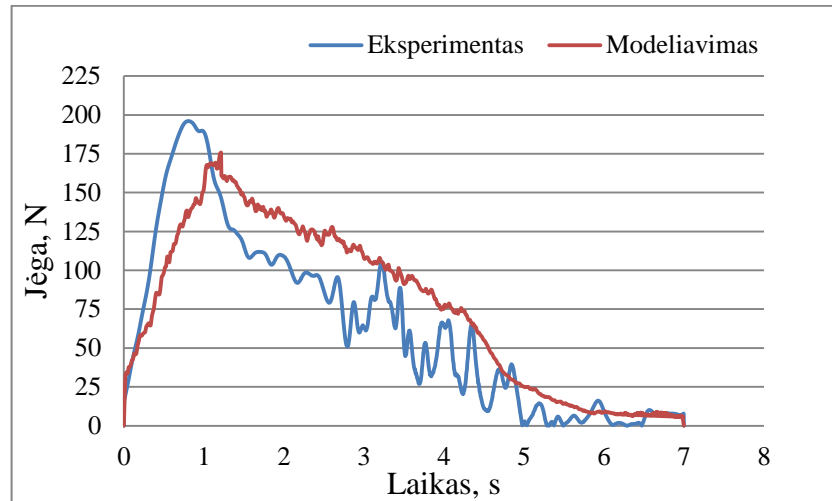
3.6 pav. Frikcinio gręžimo – sriegimo modelis suskaidytas baigtiniais elementais

Modelis suskaidytas optimalaus dydžio baigtiniais elementais. Įrankio gręžiamoji dalis suskaidyta į tūrinius tetraedro formos baigtinius elementus. Grąžto baigtinių elementų skaičius – 19553, mazgų skaičius – 3954. Įrankio sriegiamoji dalis suskaidyta į tūrinius tetraedro formos baigtinius elementus. Sriegiklio baigtinių elementų skaičius – 34792, mazgų skaičius – 6941. Plokštelė suskaidyta į tūrinius heksaedro formos baigtinius elementus. Plokštelės baigtinių elementų skaičius – 69024, mazgų skaičius – 78228.

3.4 Modeliavimo rezultatų palyginimas

Modeliavimo etape sukurtas modelis imituojantis frikcinio gręžimo procesą. Modelis kurtas atsižvelgiant į turimus bandymų rezultatus. Priskirtos analogiškos medžiagos, naudotos bandymų metu. Supaprastinta įrankio forma ir išlaikyti įrankio matmenys. Pirmiausia atlikti skaičiavimai naudojant atskirus įrankius. Skaičiuota ašinė jėga, atsirandanti frikcinio gręžimo metu. Pasirinktas

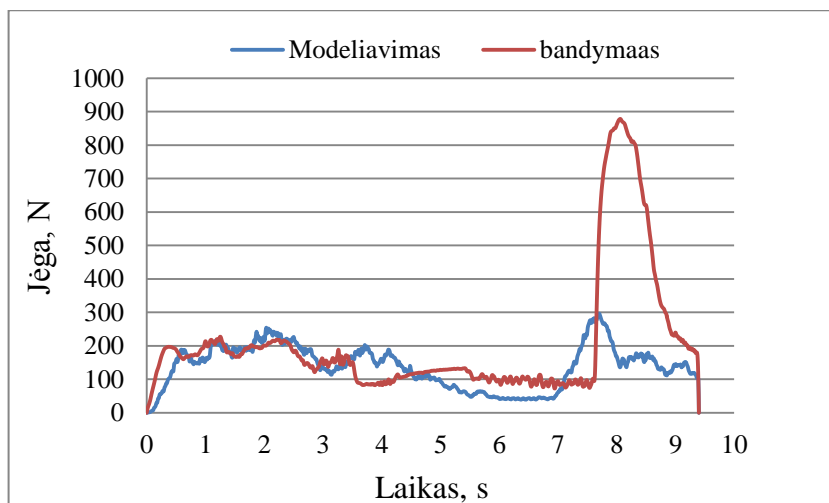
įrankio sukimosi greitis – 4000 min^{-1} ir įrankio įsigilinimo greitis – 140 mm/min . Atliekant bandymus, esant tokiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams, gautos mažiausios ašinės jėgos reikšmės. Bandymai atlikti formuojant kiaurymę 1 mm storio aliuminio ruošinyje. Modeliavimo ir bandymų rezultatų palyginimo grafikas pateikiamas 3.7 paveikslėlyje.



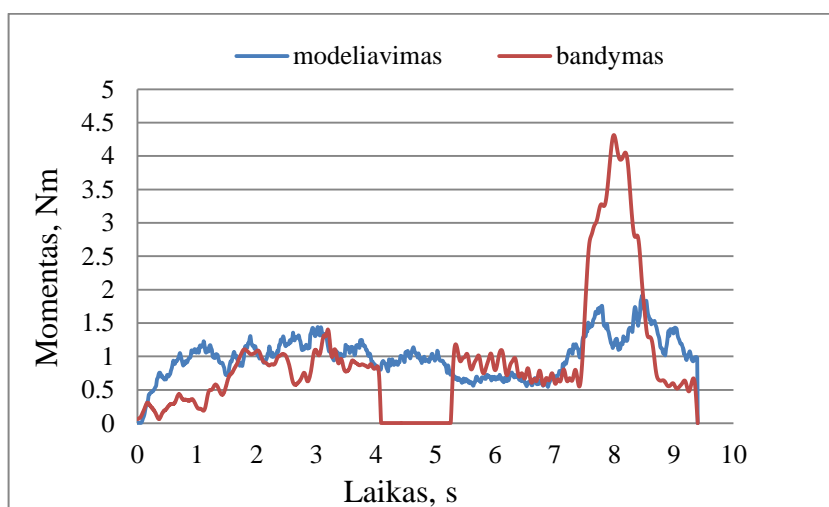
3.7 pav. Modeliavimo ir bandymų rezultatų palyginimas įrankiui sukantis 4000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 140 mm/min greičiu

Kaip matyti iš grafiko, ašinės jėgos kitimo grafikas atitinka bandymų metu gautą grafiką. Galima teigti, kad modelis yra teisingas. Modeliavimo metu gaunama mažesnė maksimali gręžimo jėga ir tolygesnis grafikas. Kadangi bandymų metu jėga matuota eksperimentiškai, matyti jėgos šuoliai laike. Tai galėjo įtakoti gaunamo signalo trukdžiai.

Toliau atlikti skaičiavimai naudojant kombinuotą įrankį. Skaičiuota ašinė jėga ir sukimosi momentas frikcinio gręžimo metu. Pasirinkti parametrai atsižvelgiant į gautus rezultatus bandymų metu. Pasirinktas įrankio sukimosi greitis – 3000 min^{-1} , įrankio įsigilinimo greitis – 140 mm/min ir įrankio sukimosi greitis sriegimo metu – 300 min^{-1} . Bandymai atlikti formuojant kiaurymę $1,5 \text{ mm}$ storio aliuminio ruošinyje. Modeliavimo ir bandymų rezultatų palyginimo grafikai pateikiami 3.8-3.9 paveikslėliuose.



3.8 pav. Gręžimo jėgos kitimo reikšmių palyginimas laike

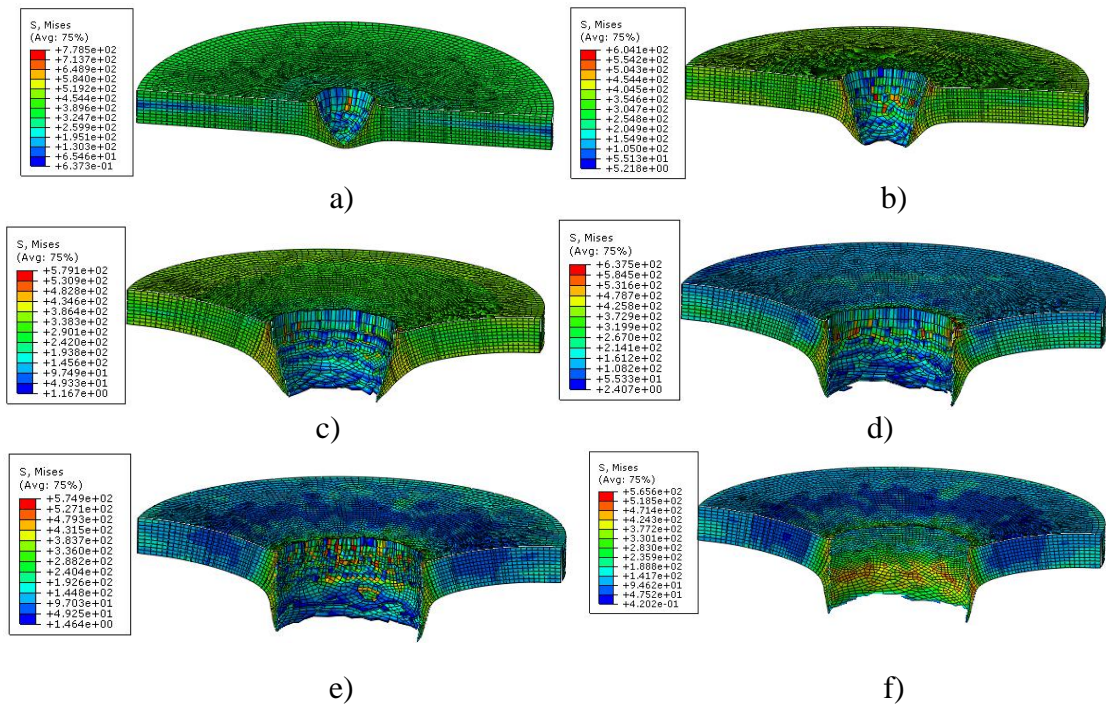


3.9 pav. Momento kitimo reikšmių palyginimas laike

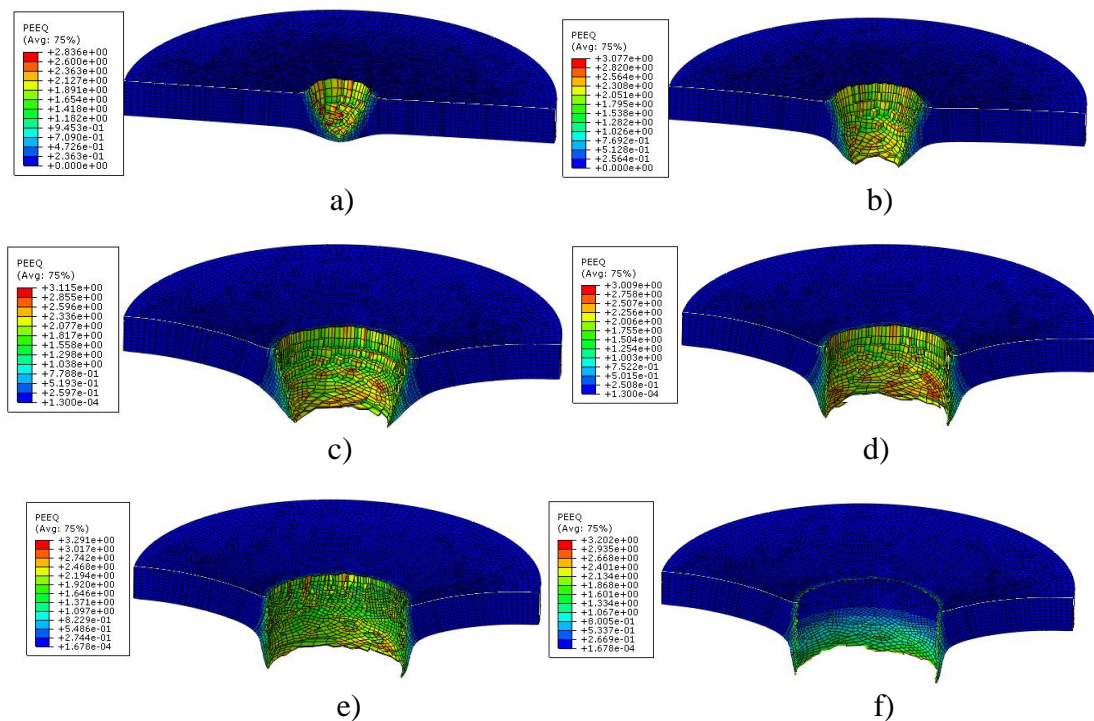
Pateiktuose grafikuose matyti jėgos ir momento pasiskirstymas laike, frikcinio gręžimo metu. Pateiktos jėgos ir momento kitimo reikšmės gautos modeliavimo ir bandymų metu. Gautos reikšmės tenkina rezultatus, gautus bandymų metu. Matyti tam tikras jėgos ir momento neatitikimas 7-9 sekundėmis. Galima teigti, kad staigų jėgos ir momento padidėjimą nulėmė netiksliai atliktų bandymų rezultatai. Staigus reikšmių padidėjimas atsiranda sriegiant sriegį suformuotoje kiaurymėje. Priimta prielaida, kad kiaurymė nebuvo tinkamo diametro sriegio formavimui. Esant mažesnei kiaurymei, reikalinga didesnė jėga ir momentas pradėti formuoti sriegį. Nepaisant nedidelio neatitikimo, bandymų rezultatai atitinka modeliavimo rezultatus. Galima teigti, kad modelis yra teisingas ir atitinka darbo sąlygas bandymų metu.

Modeliavimo metu, papildomai išvesta deformacijų reikšmių kitimas laiko intervaluose, vyraujantis Von Mises įtempių pasiskirstymas ir temperatūros pasiskirstymo laukai gręžimo metu.

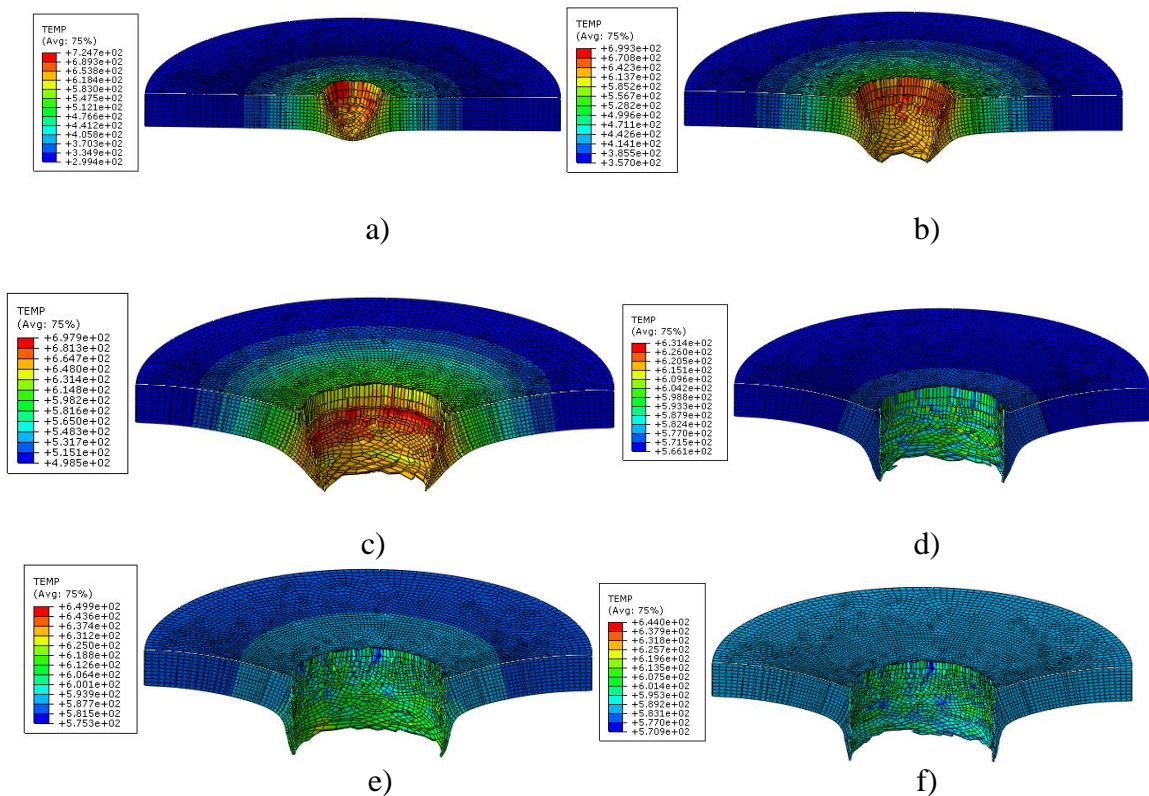
Deformacijų reikšmės pateikiamos 3.10 paveikslėlyje, Von Mises įtempių pasiskirstymo laukai pateikiami 3.11 paveikslėlyje ir temperatūriniai pokyčiai pateikiami 3.12 paveikslėlyje.



3.10 pav. Ekvivalentinių Von Mises įtempių lauko kitimas laike: a – 0.8s, b – 1.8s, c – 3.6 s, d - 5.4s, e – 7.25 s, f – 9s



3.11 pav. Ekvivalentinių deformacijų lauko kitimas laike: a – 0.8s, b – 1.8s, c – 3.6 s, d - 5.4s, e – 7.25 s, f – 9s



3.12 pav. Temperatūros pasiskirstymas laike: a – 0.8s, b – 1.8s, c – 3.6 s, d - 5.4s, e – 7.25 s, f – 9s

Paveikslėliuose matyti kaip pasiskirsto įtempių kitimo reikšmės ir deformacijos frikcinio gręžimo metu, tam tikrais laiko intervalais. Gręžimo metu atsirandantys temperatūriniai pokyčiai viršija medžiagos lydymosi temperatūrą ir tai leidžia suformuoti kiaurymę metalo ruošinyje.

3.5 Modeliavimo išvados

Šioje dalyje atlikto matematinio modeliavimo tikslas – mokslinis tyrimas. Modeliavimo darbai atlikti atkartojant realių bandymų darbo sąlygas. Modelyje įvedamos bandymų metu naudotos įrankio mechanines charakteristikos. Modelyje įvedamos charakteristikos – temperatūra, sukimosi greitis, pastūma ir kitos. Modeliavimo darbuose tirtas aliuminio lydinys Al 1050. Modeliavimo rezultatuose pateikiamos gręžimo jėgos ir momento kitimo kreivės laike. Palyginami modeliavimo ir bandymų metu gauti grafikai ir jėgų kitimo reikšmės. Padarytos išvados, kad sukurtas modelis yra teisingas ir tinkamo tikslumo. Modeliavimo metu papildomai išvestas deformacijų reikšmių kitimas laiko intervaluose, vyraujantis Von Mises įtempių pasiskirstymas ir temperatūros pasiskirstymo laukai gręžimo metu.

IŠVADOS

- Baigiamojo magistro darbe susipažinta su frikcinio gręžimo ir sriegimo procesu. Atlikta mokslinės literatūros analizė. Išanalizuoti straipsniai frikcinio gręžimo tema. Straipsniuose atliekami bandymai įvairioms metalo markėms ir storiams. Daugiausia atlikta bandymų plienams ir aliuminio lydiniams. Al 1050 markės aliuminiui atlikta palyginus mažai frikcinio gręžimo bandymų. Atsižvelgiant į turimą įrangą ir galimybes, bandymams pasirinktas šis aliuminio lydinys. Šios markės aliuminis labai paplitęs Lietuvos metalo pramonėje ir yra sąlyginai minkšta medžiaga, iš kurios gaminamos įvairiausios formos ir paskirties detalės.
- Atlikti eksperimentiniai tyrimai pasirinktam aliuminio lydiniui. Bandymams naudoti 1 ir 1.5 mm aliuminio ruošiniai. Tyrimų metu atlikti frikcinio gręžimo bandymai naudojant atskirus gręžimo ir sriegimo įrankius bei kombinuotą. Atliekant tyrimus matuota gręžimo metu atsirandanti ašinė jėga ir sukimosi momentas. Taip pat matuotas eksperimentinis gręžimo laikas.
- Atlikus bandymus sudaryti jėgos ir momento priklausomybių nuo laiko grafikai, esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams. Mažiausia jėga, formuojant kiaurymę 1 mm ruošiniui, gauta įrankiui sukantis 4000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 60 mm/min greičiu. Išmatuotas mažiausias jėgos pokytis siekia 161 N . Mažiausias sukimosi momentas užfiksuotas kiaurymei pragręžtai 4000 min^{-1} greičiu ir sriegiant sriegį 200 mm/min greičiu. Išmatuotas momento dydis siekia 0.57 Nm . Mažiausia jėga, formuojant kiaurymę 1.5 mm ruošiniui, gauta įrankiui sukantis 4000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 60 mm/min greičiu. Išmatuotas mažiausias jėgos pokytis siekia 264 N . Mažiausias sukimosi momentas užfiksuotas kiaurymei pragręžtai 4000 min^{-1} greičiu ir sriegiant sriegį 100 mm/min greičiu. Išmatuotas momento dydis siekia 0.69 Nm .
- Nustatyta analizuotų parametrų įtaka ašinės jėgos dydžiui. Parametrų įtaka nustatyta sukuriant kelių kintamųjų regresijos modelį. Regresinė analizė atlikta su statistinių duomenų apdorojimo programa SPSS. Sukurta regresinio modelio lygtis. Apskaičiuotas modelio tikslumas, siekiantis 94,9 procento. Tiesinės regresijos modelio lygtis: $F_A = 418.688 - 0.044 \cdot n + 0.653 \cdot f$. Ši lygtis leidžia apskaičiuoti ašinės jėgos dydį, esant skirtingiems įrankio sukimosi greičiams. Taip galima nustatyti optimaliausią jėgos reikšmę.

- Atlikti frikcinio gręžimo ir sriegimo bandymai naudojant kombinuotą įrankį. Sudaryti jėgos ir momento priklausomybių nuo laiko grafikai, esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams. Atlikus turimų duomenų analizę nustatyta, kad gręžimo įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiai turi nedidelę įtaką didžiausios ašinės jėgos ir momento dydžiui. Esant skirtingiems įrankio sukimosi ir įsigilinimo greičiams, pastebėtas nežymus jėgos ir momento reikšmių kitimas. Mažiausia ašinė jėga 779 N išmatuota įrankiui sukantis 2000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 100 mm/min greičiu. Mažiausias momentas 3.64 Nm išmatuotas įrankiui sukantis 2000 min^{-1} greičiu ir gilinantis 60 mm/min greičiu.
- Didžiausią įtaką kombinuoto įrankio bandymams turi įrankio forma ir geometrija. Taip pat tiksliai suderintas įrankio gręžimo kelias prieš sriegio formavimą. Labai svarbu tinkamu laiku ir tinkamu gyliu nutraukti gręžimą ir pereiti prie sriegimo operacijos. Tinkama kiaurymės forma leis sumažinti sriegimo metu atsirandančią jėgą ir momentą. Jėgos ir momento sumažėjimas padidina įrankio tarnavimo laiką.
- Bandymų metu matuotas gręžimo ir sriegimo eksperimentinis laikas. Pateikiamas atskiro gręžimo ir sriegimo įrankio kiaurymės gręžimo laiko palyginimas su kombinuotu įrankiu. Kombinuoto įrankio efektyvumas laiko atžvilgiu siekia 1.1 karto. Laiko skirtumas nėra didelis. Tačiau čia vertinamas tik gręžimo ir sriegimo laikas. Nėra įvertinamas įrankio pasikeitimas. Įvertinant visus aspektus, kombinuotas įrankis laiko atžvilgiu yra pranašesnis.
- Sudarytas frikcinio gręžimo ir sriegimo proceso modelis naudojant kombinuotą ir atskirą įrankį. Gręžimo proceso modelis sukurtas Abaqus modeliavimo paketu. Modelis kurtas atsižvelgiant į bandymų metu naudotas medžiagas ir įrankius. Siekta atkartoti bandymų metu turėtas darbo sąlygas. Atlikus modelį gauti ašinės jėgos ir momento kitimo laike grafikai. Gauti grafikai palyginti su eksperimentų metu gautais grafikais. Jėgos ir momento reikšmės tenkina bandymų metu matuotas reikšmes. Galima teigti, kad modelis yra reikiamo tikslumo ir pakankamai realus. Norint gauti tikslesnius rezultatus, reikėtų tiksliau įvertinti Al 1050 medžiagos charakteristikų (tankio, specifinės šilumos, šilumos laidumo, trinties koeficiento) priklausomybes nuo temperatūros.

LITERATŪRA

1. **Frikcinio gręžimo įrankiai.** Direct Industry [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-05-25]. Prieiga per internetą: <http://www.directindustry.com/prod/formdrill/thermal-friction-drilling-tools-13794-676653.html>;
2. **Frikcinio gręžimo įrankis.** Fdrill [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-05-25]. Prieiga per internetą: http://www.fdrill.com/en/new_view.asp?id=414;
3. **Scott F. Miller, Peter J. Blau, and Albert J. Shih.** Microstructural Alterations Associated with Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-10]. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/article/10.1361/105994905X64558#/page-1>
4. **Zülküf Demir & Cebeli Özek.** Investigate the Effect of Pre-drilling in Friction Drilling of A7075-T651 [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2014.892986>;
5. **P. V. Gopal Krishna. Kishore and V. V. Satya Narayana.** Some investigations in frictions in friction drilling AA6351 using high speed steel tools [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-15]. Prieiga per internetą: http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2010/jeas_0310_308.pdf;
6. **Cebeli Ozek, 2 Zulkuf Demir.** Investigate the Friction Drilling of Aluminum Alloys According to the Thermal Conductivity [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą: <http://www.temjournal.com/documents/vol2no1/pdf/INVEST%C4%B0GATE%20THE%20FRICTION%20DRILLING%20OF%20ALUMINIUM%20ALLOYS%20ACCORDING%20TO%20THE%20THERMAL%20CONDUCTIVITY.pdf>;
7. **Scott F. Miller, Jia Tao, Albert J. Shih.** Friction drilling of cast metals [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-02]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550500252X>. Žiūrėta 2016.01.2;
8. **Scott F. Miller, Peter J. Belau, Albert J. Shih.** Tool wears in friction drilling [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-10-30]. Prieiga per internetą: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-b9dc7fe8-04f2-367e-a188-aa61f21ac445/tab/summary>;

9. **Pant wane. P.D, Ahuja. B.B.** Experimental investigations and multi-objective optimization of friction drilling process on AISI 1015 [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-2]. Prieiga per internetą: <http://www.ipublishing.co.in/jarvol1no12010/voltwo/EIJAER2248.pdf>;
10. **P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačenga.** Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-02]. Prieiga per internetą: <http://mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/8664/4435>;
11. **Wei-Liang Ku, Ching-Lien Hung, Shin-Min Lee, Han-Ming Chow.** Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-04]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/227257908_Optimization_in_thermal_friction_drilling_for_SUS_304_stainless_steel;
12. **Scott F. Miller, Rui Li, Hsin Wang and Albert J. Shih.** Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-04]. Prieiga per internetą: <http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1450731>;
13. **Scott F. Miller, Albert J. Ship, Peter J. Belau.** Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum and titanium [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-10]. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/article/10.1361/105994905X64558#/page-1>;
14. **S.-M. Lee, H.-M. Chow & B.-H. Yan.** Friction Drilling of IN-713LC Cast Super alloy [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-2808]. Prieiga per internetą: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10426910701451697>;
15. **Scott F. Miller, Albert J. Ship, Peter J. Belau.** Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum and titanium [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2015-11-10]. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/article/10.1361/105994905X64558#/page-1>;
16. **INSTRON E10000 bandymų mašina.** Introns [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-09]. Prieiga per internetą: <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/electropuls/e10000>;
17. **R. Simutis.** „Sistemų modeliavimas ir identifikavimas“, 2008;

18. **Modeliavimo programa.** 3DS [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus>;
19. **Xiao Chun Zhang, Jian Lu & San Qian Shi.** A Computational Study of Plastic Deformation in AISI 304 Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-01-12]. Prieiga per internetą:
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15376494.2011.621828>;
20. **Jaime Front , Yoking Zhang, Ming Dao, Jian, Jian Lu, Francisco Galvez, Antoine Jerusalem.** Ballistic performance of nanocrystal line and Nan twinned ultrafine crystal steel [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-02-19]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645411008196>;
21. **K. Spranghers, I. Vasilakos, D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme.** Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-03-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X12002035>;
22. **Kęstutis Sprainys.** Srities diskretizavimo baigtiniais elementais galimybių tyrimas [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-03-16]. Prieiga per internetą:
http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2014~D_20141031_084212-60756/DS.005.0.01.ETD
23. **Baigtinių elementų tinklelis.** Mesh Generation [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-03-16]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.berkeley.edu/~jrs/meshpapers/BernPlassmann.pdf>
24. **Duomenų sklaidos analizė.** Ekonometrija. Praktinis regresijos ir laiko eilučių modelių taikymas [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą:
<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1267/ekonometrija-praktinis-regresijos-ir-laiko-eiluciu-modeliu-taikymas/>;
25. **Regresinio modelio lygtis.** Curve Estimation Models [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-03-21]. Prieiga per internetą:
http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_23.0.0/spss/base/curve_estimation_models.dita.

PRIEDAI

1 priedas. Bandymuose naudotos medžiagos ir gręžimo charakteristikos	58
2 priedas. Aliuminio 1050 mechaninės charakteristikos.....	59
3 priedas. Duomenų tinkamumo vertinimas regresinei analizei	60
4 priedas. Ašinės jėgos ir jai įtaką darančių parametrų duomenų koreliacija	64
5 priedas. Tiesinio modelio reikšmingumas.....	66
6 priedas. Kombinuoto įrankio gręžimo programa	74
7 priedas. Gręžimo ir sriegimo įrankių geometrija	75
8 priedas. Kombinuoto įrankio geometrija.....	76

1 priedas. Bandymuose naudotos medžiagos ir gręžimo charakteristikos

Medžiaga	Storis, mm	Apsisukimai, min ¹	Pastūma, mm/min
Ni - IN-713LC	2	2400	100 125 150
		3600	
		4800	
		6000	
MgAZ91D	4	7000	254
		11000	
		15000	
AISI 1015	1.5	2800	254
	1	2086	71.36 90 135 180 198.64
		2500	
		3500	
		4500	
AISI 304	1.5	3000	100
	2	1200	75
		2400	100
		3600	125
AISI 1020	1.9	4000	165
AISI 1020	1.56	2800	165
AISI 4130	1.43	1000	165
Al 5052	1.62	3600	165
A7075-T651	4	1200	20
	6	1800	40
		2400	60
		3000	80
		3600	100
AA6351	1	2000	200
		3000	900
A7075-T651 A1050 A5083 A6061	4	1200	25 50 75 100
		1800	
		2400	
		3000	
		3600	
		4200	
Al 380	4	5500	254 305 356 406
		3000	
		7000	
		11000	
		15000	

Aluminium Alloy 1050A H14 Sheet



SPECIFICATIONS

Commercial	1050A
EN	1050A

Aluminium alloy 1050 is a popular grade of aluminium for general sheet metal work where moderate strength is required.

Alloy 1050 is known for its excellent corrosion resistance, high ductility and highly reflective finish.

Applications - Alloy 1050 is typically used for:

Chemical process plant equipment
Food industry containers
Pyrotechnic powder
Architectural flashings
Lamp reflectors
Cable sheathing

CHEMICAL COMPOSITION

BS EN 573-3:2009 Alloy 1050A	
Element	% Present
Iron (Fe)	0.0 - 0.40
Silicon (Si)	0.0 - 0.25
Zinc (Zn)	0.0 - 0.07
Magnesium (Mg)	0.0 - 0.05
Titanium (Ti)	0.0 - 0.05
Manganese (Mn)	0.0 - 0.05
Copper (Cu)	0.0 - 0.05
Other (Each)	0.0 - 0.03
Aluminium (Al)	Balance

ALLOY DESIGNATIONS

Aluminium alloy 1050A also corresponds to the following standard designations and specifications **but may not be a direct equivalent:**

AA1050
S1B
A91050

TEMPER TYPES

The most common tempers for 1050 aluminium are:

- H14 - Work hardened by rolling to half hard, not annealed after rolling

SUPPLIED FORMS

Plain sheet
Plain sheet with a PVC coating on one side
Stucco sheet
Stucco sheet with a PVC coating on one side
Shate

- Sheet

GENERIC PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	2.71 g/cm ³
Melting Point	650 °C
Thermal Expansion	24 x10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	71 GPa
Thermal Conductivity	222 W/m.K
Electrical Resistivity	0.0282 x10 ⁻⁶ Ω .m

MECHANICAL PROPERTIES

BS EN 485-2:2008 Sheet 0.2mm to 6.00mm	
Property	Value
Proof Stress	85 Min MPa
Tensile Strength	105 - 145 MPa
Hardness Brinell	34 HB
Elongation A	12 Min %

Properties above are for material in the H14 condition

WELDABILITY

When welding 1050 to itself or an alloy from the same subgroup the recommended filler wire is 1100. For welding to alloys 5083 and 5086 or alloys from the 7XXX series, the recommend wire is 5356. For other alloys use 4043 filler wire.

FABRICATION

Workability – Cold: Excellent
Machinability: Poor
Weldability – Gas: Excellent
Weldability – Arc: Excellent
Weldability – Resistance: Excellent
Brazability: Excellent
Solderability: Excellent

3 priedas. Duomenų tinkumo vertinimas regresinei analizei

```

EXAMINE VARIABLES=pastuma greitis
/PLOT BOXPLOT HISTOGRAM NPLOT
/COMPARE GROUP
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.
    
```

Explore

Notes

	Output Created	30-Apr-2016 16:37:02
	Comments	
Input	Data	C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	12
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values for dependent variables are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any dependent variable or factor used.
	Syntax	EXAMINE VARIABLES=pastuma greitis /PLOT BOXPLOT HISTOGRAM NPLOT /COMPARE GROUP /STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME /CINTERVAL 95 /MISSING LISTWISE /NOTOTAL.
Resources	Processor Time	0:00:01.953
	Elapsed Time	0:00:02.141

[DataSet1] C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
pastuma	12	100.0%	0	.0%	12	100.0%
greitis	12	100.0%	0	.0%	12	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error	
pastuma	Mean	100.0000	9.84732	
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	78.3262	
		Upper Bound	121.6738	
	5% Trimmed Mean	100.0000		
	Median	100.0000		
	Variance	1163.636		
	Std. Deviation	34.11211		
	Minimum	60.00		
	Maximum	140.00		
	Range	80.00		
	Interquartile Range	80.00		
	Skewness	.000	.637	
	Kurtosis	-1.650	1.232	
	greitis	Mean	2500.0000	337.09993
95% Confidence Interval for Mean		Lower Bound	1758.0481	
		Upper Bound	3241.9519	
5% Trimmed Mean		2500.0000		
Median		2500.0000		
Variance		1363636.364		
Std. Deviation		1167.74842		
Minimum		1000.00		
Maximum		4000.00		
Range		3000.00		
Interquartile Range		2500.00		
Skewness		.000	.637	
Kurtosis		-1.428	1.232	

Extreme Values

			Case Number	Value
pastuma	Highest	1	3	140.00
		2	6	140.00
		3	9	140.00
		4	12	140.00
		5	2	100.00 ^a

a. Only a partial list of cases with the value 100.00 are shown in the table of upper extremes.

Extreme Values

			Case Number	Value
pastuma	Lowest	1	10	60.00
		2	7	60.00
		3	4	60.00
		4	1	60.00
		5	11	100.00 ^b
greitis	Highest	1	10	4000.00
		2	11	4000.00
		3	12	4000.00
		4	7	3000.00
		5	8	3000.00 ^c
	Lowest	1	3	1000.00
		2	2	1000.00
		3	1	1000.00
		4	6	2000.00
		5	5	2000.00 ^d

b. Only a partial list of cases with the value 100.00 are shown in the table of lower extremes.

c. Only a partial list of cases with the value 3000.00 are shown in the table of upper extremes.

d. Only a partial list of cases with the value 2000.00 are shown in the table of lower extremes.

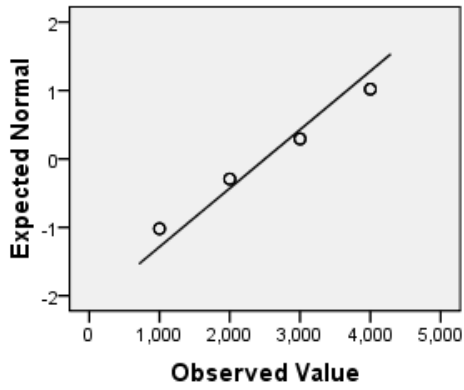
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pastuma	.213	1	.139	.811	12	.060
greitis	.166	12	.200 [*]	.876	12	.078

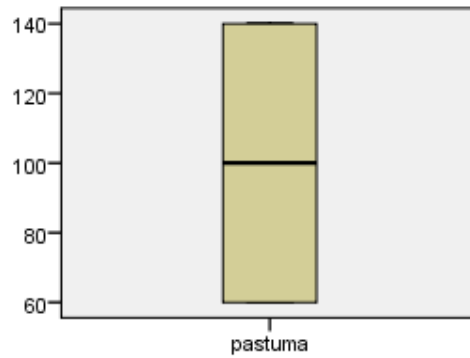
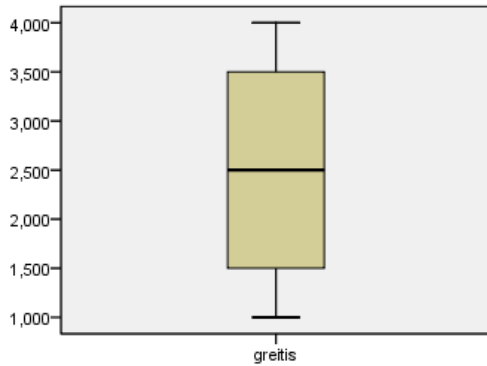
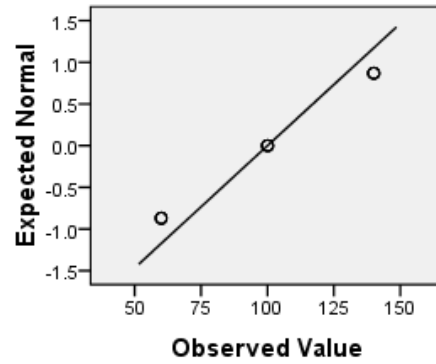
a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

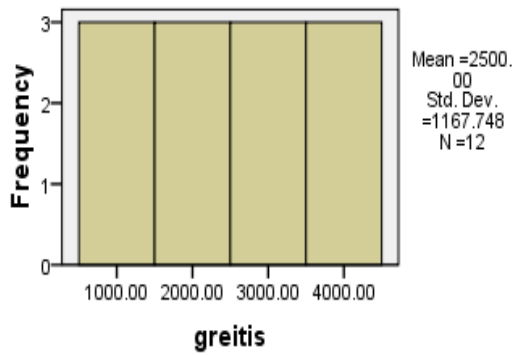
Normal Q-Q Plot of greitis



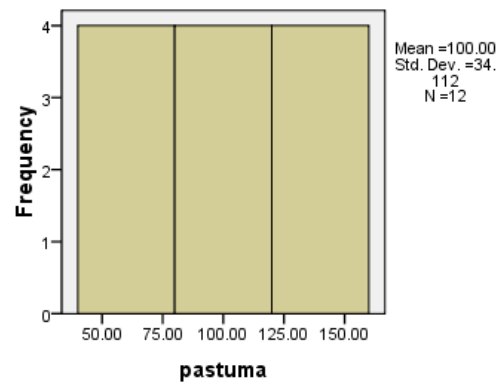
Normal Q-Q Plot of pastuma



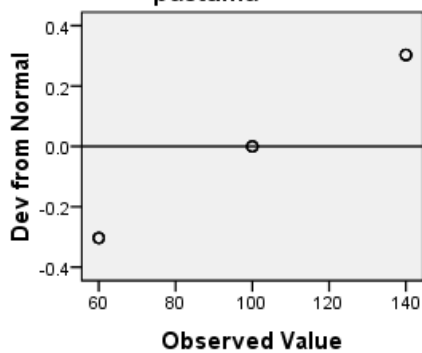
Histogram



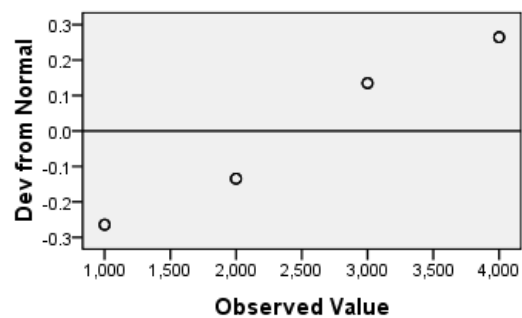
Histogram



Detrended Normal Q-Q Plot of pastuma



Detrended Normal Q-Q Plot of greitis



4 pridas. Ašines jegos ir jai itaka daranciu parametru duomenu koreliacija

```
CORRELATIONS /VARIABLES=greitis pastuma jega /PRINT=TWOTAIL NOSIG
/STATISTICS DESCRIPTIVES XPROD /MISSING=PAIRWISE.
```

Correlations

Notes		
	Output Created	30-Apr-2016 22:52:01
	Comments	
Input	Data	C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data	12
	File	
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair.
	Syntax	CORRELATIONS /VARIABLES=greitis pastuma jega /PRINT=TWOTAIL NOSIG /STATISTICS DESCRIPTIVES XPROD /MISSING=PAIRWISE.
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.013

[DataSet1] C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
greitis	2500.0000	1167.74842	12
pastuma	100.0000	34.11211	12
jega	373.6667	59.13826	12

Correlations

		greitis	pastuma	jega
greitis	Pearson Correlation	1	.000	-.871**
	Sig. (2-tailed)		1.000	.000
	Sum of Squares and Cross-products	1.500E7	.000	-662000.000
	Covariance	1363636.364	.000	-60181.818
	N	12	12	12
pastuma	Pearson Correlation	.000	1	.377
	Sig. (2-tailed)	1.000		.022
	Sum of Squares and Cross-products	.000	12800.000	8360.000
	Covariance	.000	1163.636	760.000
	N	12	12	12
jega	Pearson Correlation	-.871**	.377	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.022	
	Sum of Squares and Cross-products	-662000.000	8360.000	38470.667
	Covariance	-60181.818	760.000	3497.333
	N	12	12	12

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5 priedas. Tiesinio modelio reikšmingumas

```

EXAMINE VARIABLES=pastuma greitis
/PLOT BOXPLOT HISTOGRAM NPLOT
/COMPARE GROUP
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.
    
```

Explore

Notes

	Output Created	30-Apr-2016 16:37:02
	Comments	
Input	Data	C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	12
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values for dependent variables are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any dependent variable or factor used.
	Syntax	EXAMINE VARIABLES=pastuma greitis /PLOT BOXPLOT HISTOGRAM NPLOT /COMPARE GROUP /STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME /CINTERVAL 95 /MISSING LISTWISE /NOTOTAL.
Resources	Processor Time	0:00:01.953
	Elapsed Time	0:00:02.141

[DataSet1] C:\Users\Zveris\Desktop\grezimas.sav

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
pastuma	12	100.0%	0	.0%	12	100.0%
greitis	12	100.0%	0	.0%	12	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error	
pastuma	Mean	100.0000	9.84732	
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	78.3262	
		Upper Bound	121.6738	
	5% Trimmed Mean	100.0000		
	Median	100.0000		
	Variance	1163.636		
	Std. Deviation	34.11211		
	Minimum	60.00		
	Maximum	140.00		
	Range	80.00		
	Interquartile Range	80.00		
	Skewness	.000	.637	
	Kurtosis	-1.650	1.232	
	greitis	Mean	2500.0000	337.09993
95% Confidence Interval for Mean		Lower Bound	1758.0481	
		Upper Bound	3241.9519	
5% Trimmed Mean		2500.0000		
Median		2500.0000		
Variance		1363636.364		
Std. Deviation		1167.74842		
Minimum		1000.00		
Maximum		4000.00		
Range		3000.00		
Interquartile Range		2500.00		
Skewness		.000	.637	
Kurtosis		-1.428	1.232	

Extreme Values

			Case Number	Value
pastuma	Highest	1	3	140.00
		2	6	140.00
		3	9	140.00
		4	12	140.00
		5	2	100.00 ^a

a. Only a partial list of cases with the value 100.00 are shown in the table of upper extremes.

Extreme Values

			Case Number	Value
pastuma	Lowest	1	10	60.00
		2	7	60.00
		3	4	60.00
		4	1	60.00
		5	11	100.00 ^b
greitis	Highest	1	10	4000.00
		2	11	4000.00
		3	12	4000.00
		4	7	3000.00
		5	8	3000.00 ^c
	Lowest	1	3	1000.00
		2	2	1000.00
		3	1	1000.00
		4	6	2000.00
		5	5	2000.00 ^d

b. Only a partial list of cases with the value 100.00 are shown in the table of lower extremes.

c. Only a partial list of cases with the value 3000.00 are shown in the table of upper extremes.

d. Only a partial list of cases with the value 2000.00 are shown in the table of lower extremes.

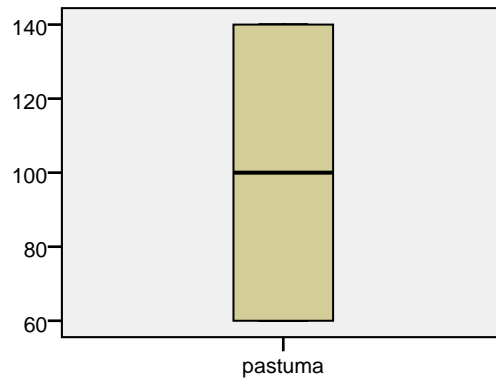
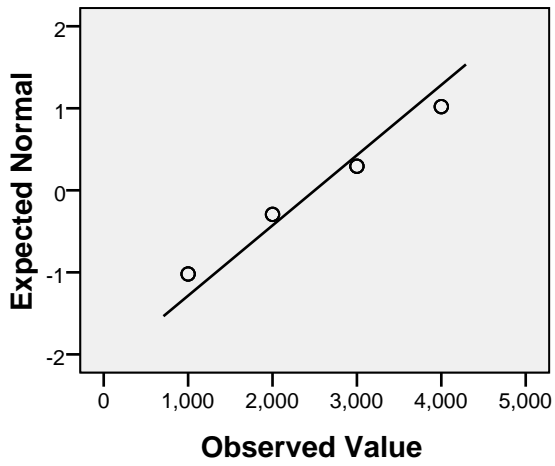
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pastuma	.213	12	.139	.811	12	.012
greitis	.166	12	.200 [*]	.876	12	.078

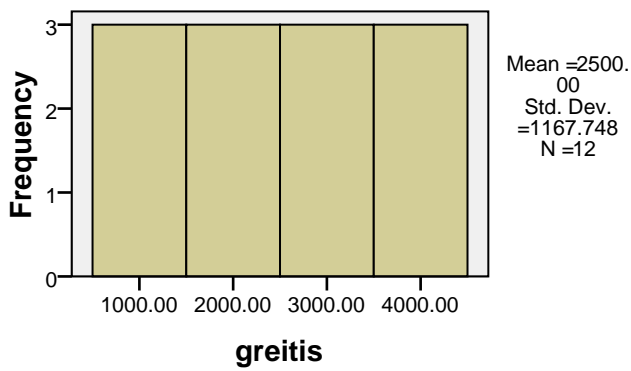
a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

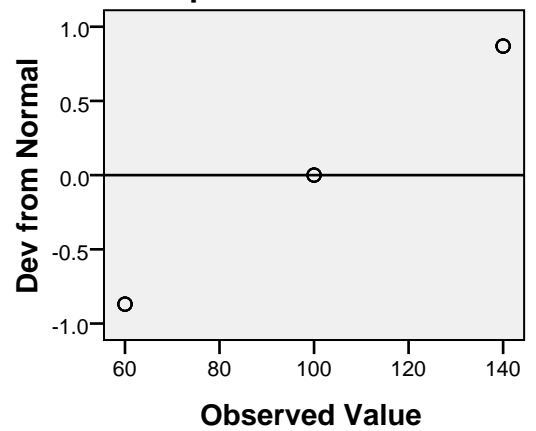
Normal Q-Q Plot of greitis



Histogram

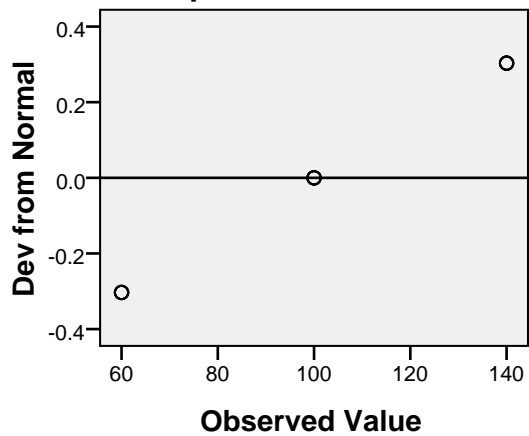


Detrended Normal Q-Q Plot of pastuma

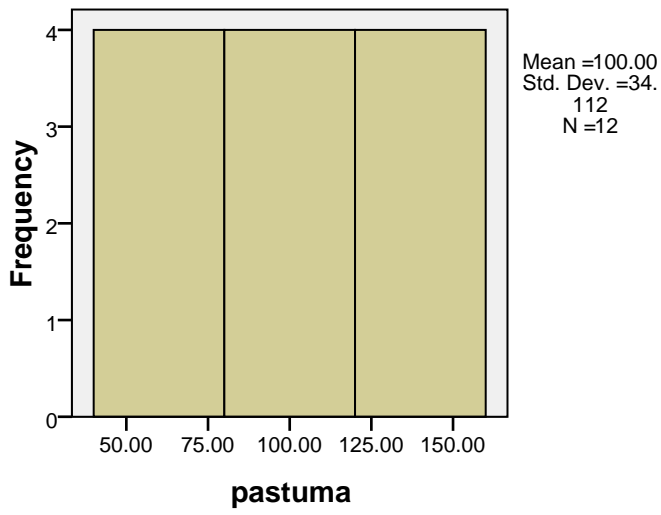


pastuma

Detrended Normal Q-Q Plot of pastuma

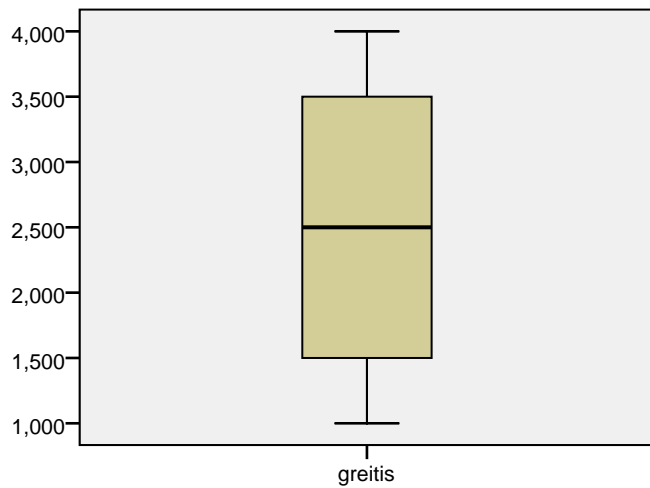
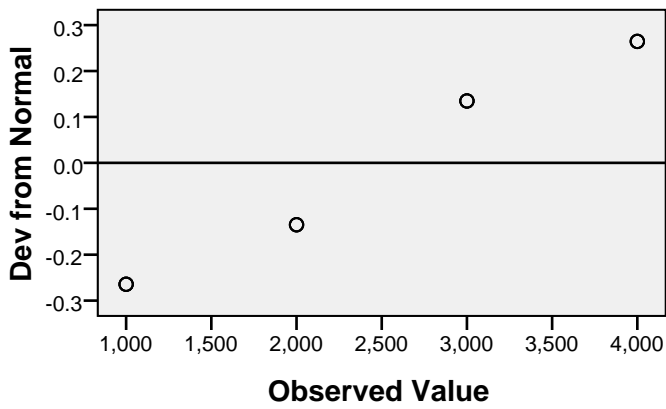


Histogram



greitis

Detrended Normal Q-Q Plot of greitis



```

REGRESSION
  /MISSING LISTWISE
  /STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA COLLIN TOL
  /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
  /NOORIGIN
  /DEPENDENT juga
  /METHOD=ENTER n f
  /SAVE PRED RESID.

```

Regression

Notes

	Output Created	18-May-2016 00:20:09
	Comments	
Input	Active Dataset	DataSet0
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	12
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.
	Syntax	REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA COLLIN TOL /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT juga /METHOD=ENTER n f /SAVE PRED RESID.

Notes

Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.014
	Memory Required	1644 bytes
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes
Variables Created or Modified	PRE_1	Unstandardized Predicted Value
	RES_1	Unstandardized Residual

[DataSet0]

Variables Entered/Removed

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	f, n ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.949 ^a	.901	.879	20.53256

a. Predictors: (Constant), f, n

b. Dependent Variable: juga

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. ^a
1	Regression	34676.392	2	17338.196	41.126	.000 ^a
	Residual	3794.275	9	421.586		
	Total	38470.667	11			

a. Predictors: (Constant), f, n

b. Dependent Variable: juga

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	418.688	23.241		18.015	.000
	n	-.044	.005	-.871	-8.325	.000
	f	.653	.181	.377	3.599	.006

a. Dependent Variable: juga

Coefficients^a

Model		Collinearity Statistics	
		Tolerance	VIF
1	n	1.000	1.000
	f	1.000	1.000

a. Dependent Variable: juga

Collinearity Diagnostics^a

Model		Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
					(Constant)	n	f
1	1	2.821	1.000	.01	.02	.01	
	2	.137	4.533	.02	.75	.24	
	3	.041	8.248	.98	.23	.75	

a. Dependent Variable: juga

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	281.3417	465.9917	373.6667	56.14623	12
Residual	-35.60833	26.13333	.00000	18.57240	12
Std. Predicted Value	-1.644	1.644	.000	1.000	12
Std. Residual	-1.734	1.273	.000	.905	12

a. Dependent Variable: juga

SAVE OUTFILE='C:\Users\Zveris\Desktop\linijiniskart.sav'
/COMPRESSED.

6 priedas. Kombinuoto įrankio gręžimo programa

G90 G94 G17

M3 S3000

G0 X0 Y0 Z40

G0 Z1

G1 Z-9 F140

M5

G9 G95

M3 S300 G1 Z-20 F1.25

M5

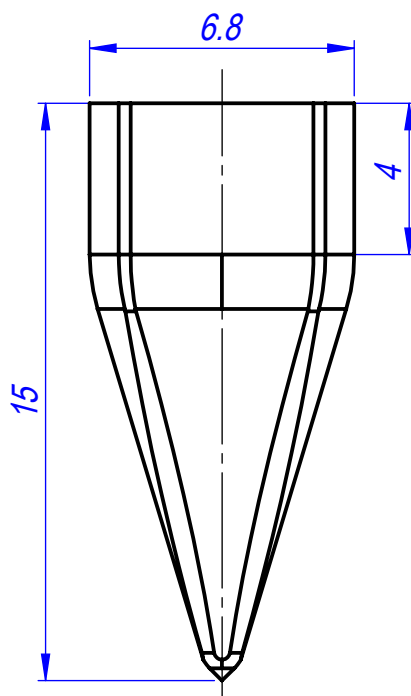
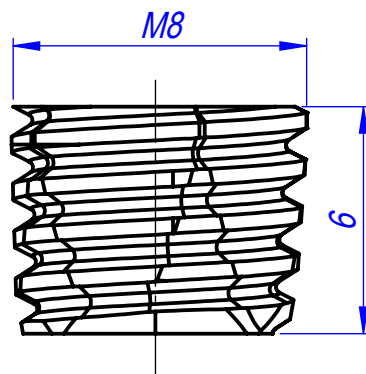
M9

M4 S300 G1 Z5 F1.25

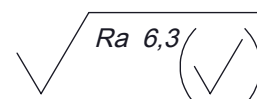
G0 Z10

M5

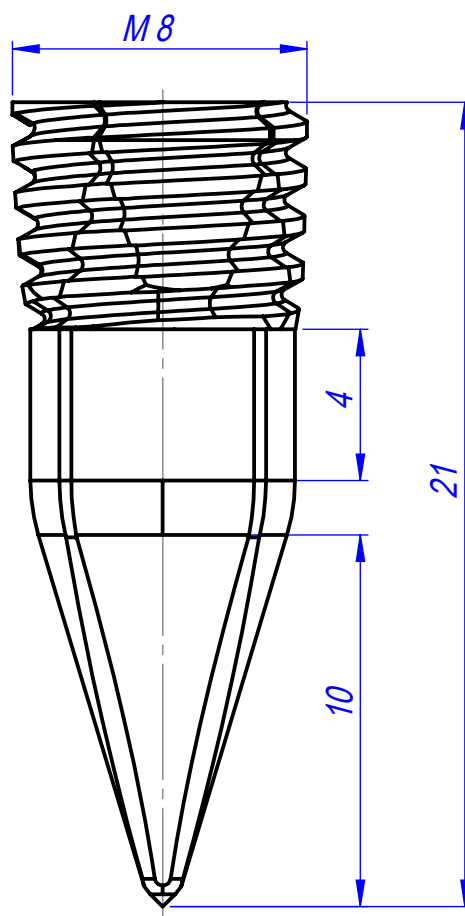
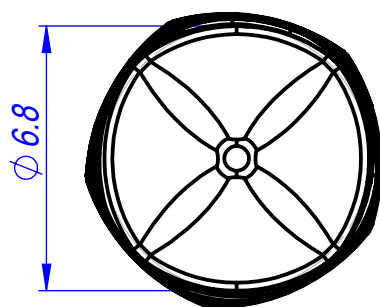
M30



1. *Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768.*
2. *Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=0.5$ mm.*



	<i>Byla, laikmena</i>	<i>Papildoma informacija</i>	<i>Medžiaga</i> <i>Plienas</i>	<i>Mastelis</i> <i>M 5:1</i>
<i>Atsakinga žinyba</i> <i>IPK</i>	<i>Vadovas</i>	<i>Dokumento tipas</i> <i>Detalės brėžinys</i>	<i>Dokumento statusas</i> <i>Mokomasis</i>	
<i>Savininkas</i> <i>KTU</i>	<i>Rengė</i> <i>Valdas Mižutavičius</i>	<i>Antraštė</i> <i>Grežimo-sriegimo įrankiai</i>	<i>Žymuo</i> <i>PR-02.02.01.001</i>	
	<i>Tvirtino</i> <i>R. Česnavičius</i>		<i>Laida</i> <i>A</i>	<i>Data</i> <i>20/04/2016</i>
			<i>Kalba</i> <i>lt.</i>	<i>Lapas</i> <i>1/1</i>



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=0.5$ mm.

$\sqrt{\text{Ra } 6,3}$ (✓)

	Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas	Mastelis M 5:1
Atsakinga žinyba IPK	Vadovas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU	Rengė Valdas Mižutavičius	Antraštė Kombinuotas įrankis	Žymuo PR-01.01.01.001	
	Tvirtino R. Česnavičius		Laida A	Data 5/15/2016
			Kalba lt.	Lapas 1/1