

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

Julius Juška

**ALUMINIO LYDINIŲ FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO
PROCESO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. Ramūnas Česnavičius

KAUNAS, 2018

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

**ALIUMINIO LYDINIŲ FRIKCINIO TAŠKINIO SUVIRINIMO
PROCESO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (621H70004)

Vadovas

(parašas) Doc. Ramūnas Česnavičius
(data)

Recenzentas

(parašas) prof. Povilas Krasauskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Julius Juška
(data)

KAUNAS, 2018

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

Tvirtinu:
Gamybos inžinerijos
katedros vedėjas

(parašas, data)
Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS
Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA

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

1. Projekto tema - Aliuminio lydinių frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimas / *Investigation of friction stir spot welding of aluminum alloys.* _____

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

2. Projekto tikslas - iširti frikcinio taškinio virinimo parametrus naudojant skirtingus aliuminio lydinis, naudojant skirtingus parametrus, bei skirtingos formos įrankius. Tiriant atlikti tiek eksperimentinius (realius) bandymus, tiek teorinius skaičiavimus. _____

3. Projekto struktūra – Literatūros analizė, eksperimentinė dalis, išvados, literatūra. _____

4. Reikalavimai ir sąlygos _____

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

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Studentas _____

(studento vardas, pavardė) _____
(parašas, data)

Vadovas _____

(pareigos, vardas, pavardė) _____
(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS.....	8
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	9
1.1. Suvirinimo tipai ir procesai.....	9
1.2. Frikcinis taškinis virinimas.....	11
1.3. Frikcinio taškinio virinimo privalumai ir trūkumai.....	12
1.4. Frikcinio taškinio virinimo įrankiai.....	13
1.5. Frikcinio taškinio virinimo robotai.....	14
1.6. Frikcinio taškinio virinimo parametrai.....	16
1.7. Aliuminio lydinių frikcinis taškinis virinimas.....	17
1.8. Atlikti frikcinio taškinio virinimo bandymai su aliuminio lydiniais.....	17
1.9. Literatūros apžvalgos išvados.....	18
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS.....	19
2.1. Įvadas.....	19
2.2. Eksperimentinė įranga.....	19
2.3. Medžiagų mikrostruktūrų tyrimas.....	22
2.4. Medžiagų charakteristikos.....	24
2.5. Eksperimentinių rezultatų analizė.....	24
2.6. Suvirintų lydinių mikrostruktūrų tyrimų rezultatų analizė.....	48
2.7. Statistinė sklaidos analizė ANOVA.....	50
IŠVADOS.....	55
LITERATŪRA.....	56
PRIEDAS 1.....	58
PRIEDAS 2.....	59



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Juliaus Juškos**, baigiamasis projektas tema „Aluminių lydinių frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Julius Juška. Aliuminio lydinių frikcinio taškinio suvirinimo proceso tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc dr. Ramūnas Česnavičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *Frikcinis taškinis suvirinimas, ANOVA analizė, mikrostruktūrų tyrimas.*
Kaunas, 2018. 59 p.

SANTRAUKA

Magistrinio darbo tikslas – ištirti frikcinio taškinio virinimo parametrus naudojant skirtingus aliuminio lydinius, naudojant skirtingus parametrus, bei skirtingos formos įrankius. Tiriant atlikti eksperimentiniai (realius) bandymai ir teoriniai skaičiavimai.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros apžvalga. Surinkta informacija apie frikcinio taškinio virinimo proceso (FSSW) bandymų rezultatus, apžvelgiant pramonėje naudojamų įvairių aliuminio lydinių panaudojimą.

Antrajame skyriuje aprašoma eksperimentiniai bandymų standai ir atlikti frikcinio taškinio suvirinimo bandymai. Keičiant įrankio sukimosi greitį n , ašinę pastūmą F_y , įrankio formą (trikampė, keturkampė). Bandymai buvo atlikti dviejų aliuminio lydinių plokštelėmis – AlMg3W19, bei TL091-T4. Sudaryti ašinių jėgų F_a , bei momentų M priklausomybių grafikai nuo laiko. Atliktas suvirinimo zonų tyrimas, bei statistinė rezultatų sklaidos ANOVA analizė.

Julius Juška. Investigation of friction stir spot welding of aluminum alloys: Master's Final Project / supervisor doc dr. Ramūnas Česnavičius. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.

Key words: *Friction stir spot welding , ANOVA analysis, microstructure research.*

Kaunas, 2018. 59 p.

SUMMARY

The purpose of the master's thesis is to do research on spot friction welding using different types of aluminum alloys, different parameters and various shapes of a tool. Doing the research experimental (real) test and theoretical calculations were made.

In the first chapter was reviewed the literature. Information of the results of the friction stir spot welding (FSSW) test were collected, reviewing the use of various industrial uses of aluminum alloys.

The second chapter describes experimental tests stands and tests for friction stir spot point welding. Changing tool speed n , axial feed F_y , tool shape (triangle, quadrilateral). The tests were performed on two types of aluminum alloys - AlMg3W19 and TL091-T4. Graphics describing relationships of axial forces and bending moments from welding time were made. A review of welding zones were performed, as well as a statistical analysis of the results distribution ANOVA.

Įvadas

Temos aktualumas. Virinimas jau nuo seno yra vienas iš populiariausių ir patikimiausių procesų, kai norime sujungti du metalinius kūnus. Nors virinimas naudojamas jau daugelį metų, tačiau jo nauda, bei populiarumas naudojant šią sujungimo technologiją nemažėja, o tik didėja. Plačiai naudojami tokie senieji virinimo būdai: dujinis suvirinimas, kontaktinis suvirinimas, taškinis suvirinimas, reljefinis suvirinimas, sandūrinis suvirinimas. Šiais laikais labai populiarėja tokie inovatyvūs suvirinimo būdai kaip: ultragarsinis suvirinimas, lazerinis suvirinimas, bei frikcinis suvirinimas. Šie suvirinimo būdai vis plačiau yra taikomi automobilių pramonėje, žemės ūkio pramonėje ir daugelyje kitų su metalu susijusių pramonės šakų.

Pirmieji frikcinio virinimo bandymai buvo atliekami XX amžiaus pabaigoje. Jau pirmaisiais bandymo metais buvo pastebėta, jog frikcinis virinimas gali būti naudingesnis už tradicinius virinimo būdus. Tačiau šis virinimo tipas dar nėra plačiai taikomas pramonėje, bet yra dedama vis daugiau pastangų norint išstobulinti šį virinimo būdą, jog jį būtų galima taikyti serijinėje arba masinėje gamyboje. Vis daugiau metalų gamybos pramonės atstovų, ypač automobilių, naudoja aliuminio lydinių medžiagas norėdami sumažinti automobilių svorį. Todėl frikcinis taškinis suvirinimo būdas įgauna dar didesnį populiarumą.

Darbo tikslas – ištirti frikcinio taškinio virinimo parametrus naudojant skirtingus aliuminio lydinis, naudojant skirtingus parametrus, bei skirtingos formos įrankius. Tiriant atlikti tiek eksperimentinius (realius) bandymus, tiek teorinius skaičiavimus.

Darbo uždaviniai:

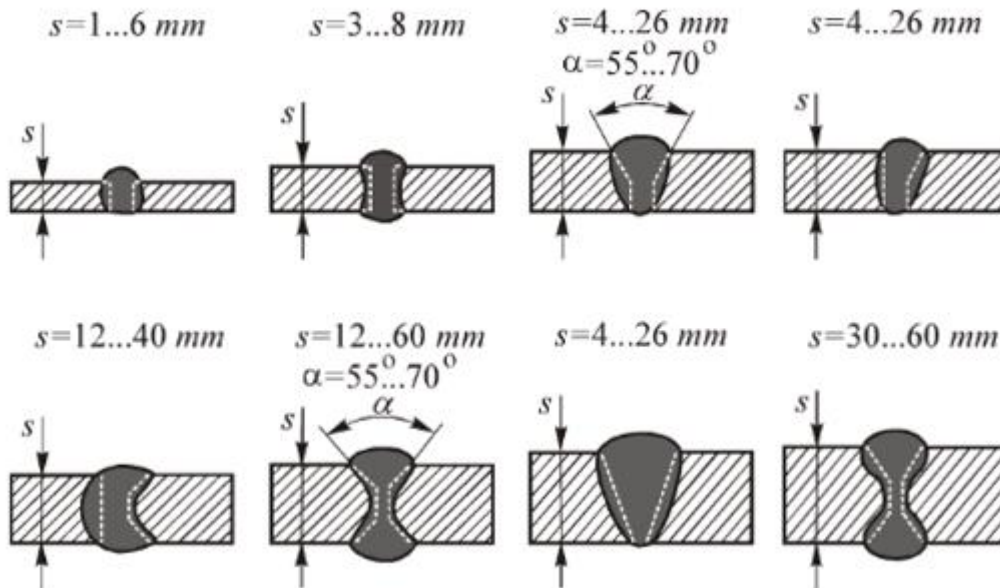
- Atlikti literatūros apžvalgą;
- Atlikti frikcinio taškinio virinimo bandymus;
- Atlikti ANOVOS sklaidos analizės skaičiavimus;
- Atlikus bandymus suformuluoti tinkamas išvadas.

1.Literatūros analizė

1.1 Suvirinimo tipai ir procesai

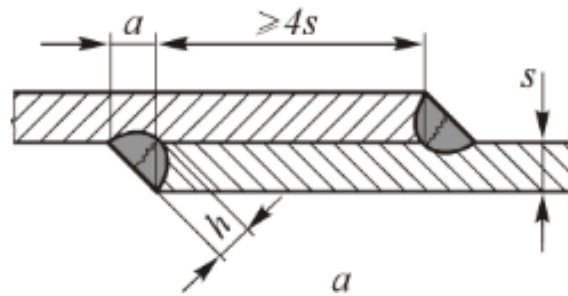
Esminis virinimo proceso tikslas yra sudaryti neišardomas jungtis. Proceso esmė: du metalo ruošiniai yra suglausti vienas su kitu. Virinimo metu ties metalų sandūra paviršius yra įkaitinamas ir užliejamas ištirpintu pridėtiniu metalu, o metalų ruošinių kraštai išsilydo. Dažniausiai suvirinimo metu yra naudojama pridėtinė viela arba elektrodas. Aukštoje temperatūroje elektrodai arba pridėtinė viela tirpsta. Ir taip užlieja dviejų paviršių sandūrą, bei ruošinių paviršius ir taip sudaro virinimo siūlę[1].

Skirstyti jungtis galima pagal keletą požymių: paskirtį, technologiją, tarpusavio išdėstymą. Pagrindinės jungtys yra skirstomos pagal siūlės tipą ir yra tokios – sandūrinės, užleistinės, tėjinės, kampinės. **Sandūrinio tipo jungtys** – tai yra labiausiai išstobulintos jungtys iš visų žinomų jungčių. Norint sėkmingai suvirinti elementus šiuo virinimo būdu pirmiausia reikia atsižvelgti į virinamų ruošinių storį, atitinkamai paruošti jų galus. Pagrindiniai sandūrinių siūlių pavyzdžiai pateikti (pav.1.1).



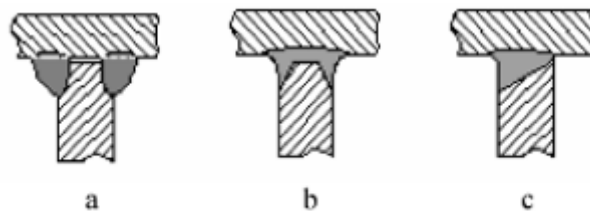
1.1 pav. Sandūrinių jungčių pavyzdžiai

Užleistinio tipo jungtys – tai jungtys, kai yra virinama kampinėmis suvirinimo jungtimis. Jungiamų elementų paviršių persidengimo paviršiaus ilgis turi būti bent jau keturis kartus ilgis nes virinamų elementų storis (pav.1.2). Norint sėkmingai suvirinti elementus šiuo virinimo būdu reikia tinkamai paruošti jų paviršius.



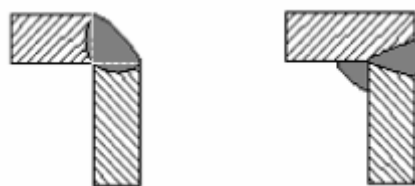
1.2 pav. Užleistinio tipo jungties pavyzdys

Tėjinio tipo jungtys – tokio tipo jungtyse virinamų ruošinių paviršiai yra statmeni vienas kitam. Vieno ruošinio briauna arba kraštinė yra privirinama prie kito ruošinio plokštumos paviršiaus (pav. 1.3).



1.3 pav. Tėjinių siūlių tipo pavyzdys

Kampinio tipo jungtys – šio tipo jungtys yra labai panašios į tėjinio tipo jungtis. Šio virinimo metu jungiami paviršiai taip pat turi būti statmeni vienas kitam, retais atvejais pasvirę tam tikru kampu (pav. 1.4). Norint pasiekti tinkamą virinimo kokybę galioja tos pačios paviršių paruošimo sąlygos kaip ir prieš tai minėtuose virinimo būduose [2].



1.4 pav. Kampinių siūlių tipo pavyzdys

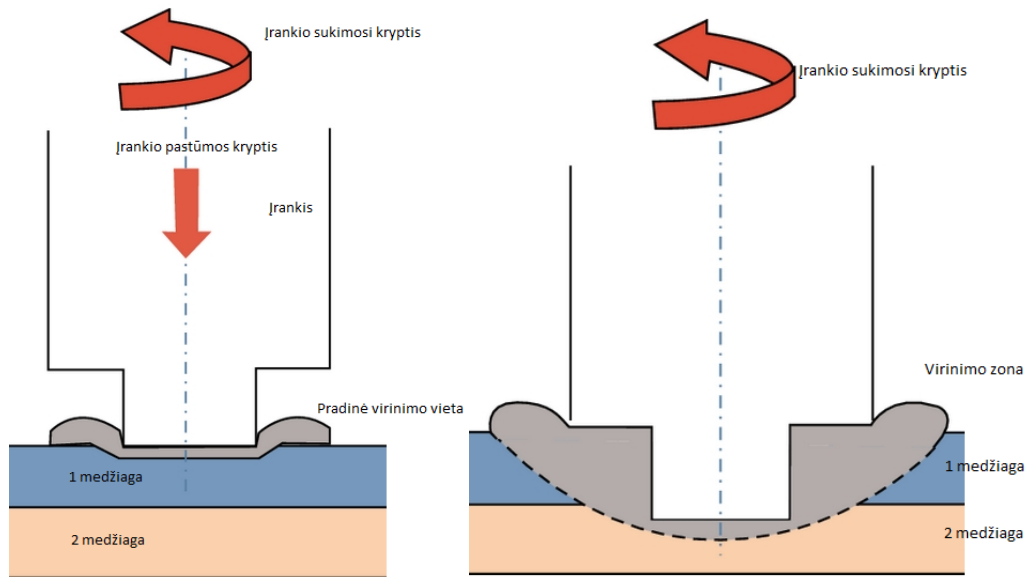
Patogiausi suvirinimo būdai yra šie:

- Lankinis suvirinimas
- Lankinis suvirinimas po fliuo sluoksniu
- Suvirinimas apsauginėje dujų aplinkoje
- Elektrinis šlakinis suvirinimas
- Dujinis suvirinimas
- Suvirinimas spinduliais
- Varžinis suvirinimas
- Kontaktinis suvirinimas

1.2 Frikcinis taškinis virinimas

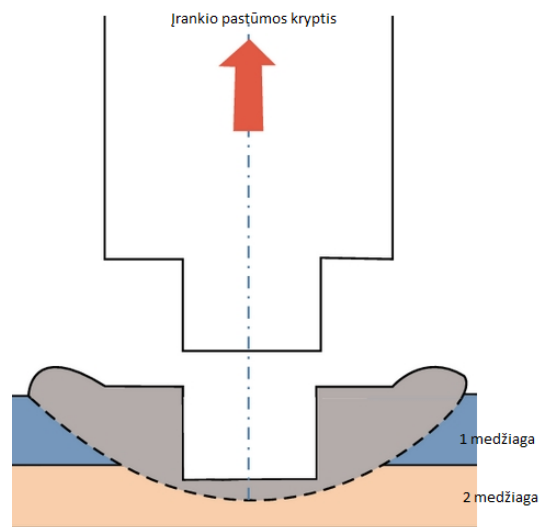
Frikcinis taškinis suvirinimas yra vienas iš naujausių ir mažiausiai ištirtų virinimo būdų ne tik Lietuvoje, bet ir visame pasaulyje, todėl daug mokslinių organizacijų, privačių ir valstybinių pramoninių įmonių, universitetų ir jų studentų yra skatinami atlikti įvairius tyrimus atliekant frikcinio taškinio virinimo bandymus.

Frikcinis taškinis virinimas (FSSW) buvo išrastas 1993 metais Mazda Motors korporacijos. Pirmiausia virinimo procesas prasideda kai virinimo įrankis sukasi dideliu kampiniu greičiu (pav. 1.5a). Po to įrankis yra leidžiamas link viršutinio virinimo paviršiaus iki tol kol įrankio dugnas jį paliečia ir suformuoja virinimo vietą. Besigilinant virinimo įrankis sukelia medžiagų lydymasi toje vietoje. Kai įrankis įsigilina į reikiama gylį tada prasideda maišymo etapas. Įrankis nustatytame gylyje sukasi reikiamu greičiu. Besisukant įrankiui medžiagoje trinties šiluma yra generuojama ir greta įrankio esančios dviejų detalių medžiagos yra įkaitinamos, suminkštinamos, sumaišomos (pav. 1.5b). Pasiekus tikslą įrankis yra ištraukiamas į pradinę padėtį (pav. 1.5c). Tokiu būdu yra atliekamas frikcinis taškinis virinimas. Atliekant tokį virinimą reikia atsižvelgti į tai, jog įrankis turi pasiekti tokį gylį, jog įrankis pasiektų abi medžiagas [3].



1.5a. pav. Įrankio įsigilinimas [4]

1.5b. pav. Maišymo procesas [4]



1.5c. pav. Įrankio ištraukimo procesas [4]

1.3 Frikcinio taškinio virinimo privalumai ir trūkumai

Lyginant frikcinį taškinį virinimą (FSSW) su kitais neišardomo sujungimo būdais vienas iš didžiausių privalumų yra tai, jog virinimo proceso metu ant paviršiaus esantys oksidai ar tam tikri teršalai neturi įtakos virinimo kokybei. Taip pat šiam procesui nereikia sukurti aukštos temperatūros, šalia virinamo paviršiaus deformacija yra minimali. Kitaip nei virinime lanku ar panašiu būdu paviršiuje neatsiranda pūslų ir po virinimo paviršiaus beveik nereikia papildomai apdirbti.

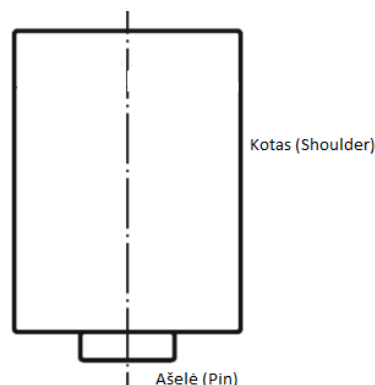
Kitas svarbus privalumas yra stiprumas. Kawasaki įmonė bandymų metodu nustatė, jog virinant 60 vienetų nuo 6061-T6 aliuminio plokštelių (0,635 mm storio) iki 2024-T3 aliuminio plokštelių (0,508 mm storio) pavyko sukurti tokį sujungimą, kurio vidutinė šlyties jėga buvo apie 2,4 N [5]. Lyginant su kontaktiniu virinimo būdu, esant toms pačioms medžiagoms ir sąlygoms, vidutinė šlyties jėga yra lygi apie 1N. Taigi galima teigti, jog frikcinio taškinio virinimo būdu pagamintas sujungimas, šlyties jėga yra daugiau nei dvigubai didesnė kontaktinio suvirinimo metu gauta jėga.

Dar vienas svarbus privalumas yra tai, jog toks virinimo būdas yra ekonomiškai pigesnis, bei efektyvesnis konstrukcijų sujungimo būdas. Tokiam virinimo būdui nereikia daug elektros lyginant su kitais virinimo būdais. Taip pat nereikalingas energijos šaltinis, bei aušinimas vandeniū ar kitais aušinimo skysčiais.

Pagrindinis minusas yra toks, jog frikcinio taškinio virinimo būdas kol kas nėra dar plačiai taikomas pramonėje, išskyrus keletą kaip prieš tai minėta Kawasaki įmonė. Šis virinimo būdas, kol kas labiau yra teorinis nei praktinis, tačiau turi dideles perspektyvas išeiti į plačiuosius gamybos vandenis, nes turi daug prieš tai išvardintų privalumų.

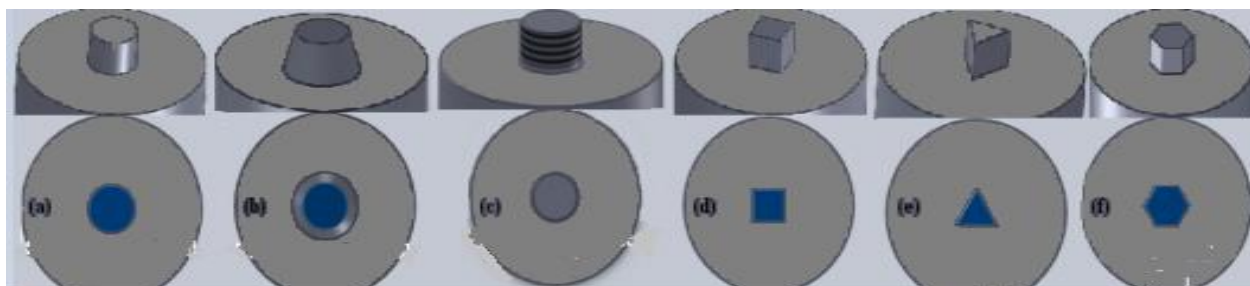
1.4 Frikcinio taškinio virinimo įrankiai

Frikciniam taškiniam virinimui yra naudojami pakietinti (termiškai pagerinti įrankiai), tiek, jog jie būtų kietesni už virinamos medžiagos kietumą. Šie įrankiai yra pakankamai atsparūs dilimui. Jie turi geras statines ir dinamines charakteristikas esant aukštai temperatūrai. Įrankiai sukasi reikiamu kampiniu greičiu ir juda išilgai tarp dviejų virinimų detalių. Frikcinio virinimo įrankis paprastai susidaro iš koto (shoulder) ir ašelės (pin) (pav. 1.6.) Įrankio ilgis atitinka norimo virinimo gylio ilgį. Ašelė yra leidžiama pagal bendrą dviejų virinamų medžiagų ašį iki tokio saugaus gylio, jog įrankio kotas nepasiektų viršutinio virinamo medžiagos paviršiaus [6].



1.6 pav. Įrankio sudedamosios dalys

Pagrindinės įrankių formos yra tokios: tiesaus cilindro (pav. 1.7 a), kūginio cilindro (pav. 1.7 b), sriegto cilindrinio paviršiaus (pav. 1.7 c), keturkampio formos (pav. 1.7 d), trikampio formos (pav. 1.7 e), bei šešiakampio formos (pav. 1.7 f). [7]



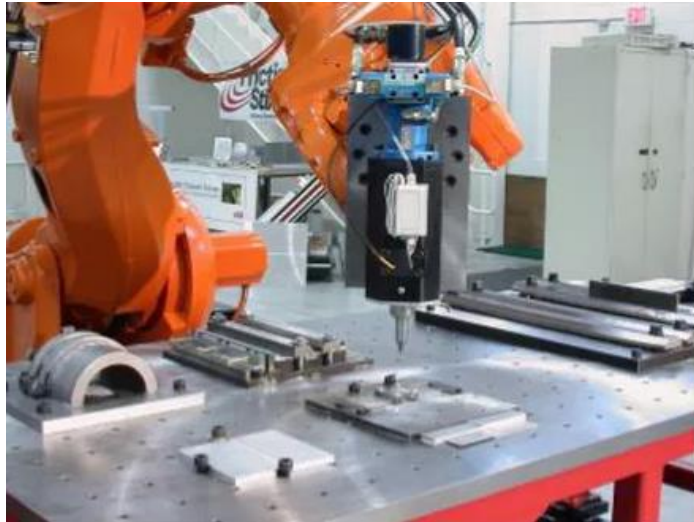
1.7 pav. Įrankių formos – a – tiesaus cilindro, b – kūginio cilindro, c – sriegto cilindrinio paviršiaus, d – keturkampio formos, e – trikampio formos, f – šešiakampio formos.

Nuo įrankio formos geometrijos priklauso kaip vyks virinamos medžiagos perėjimas iš kietos medžiagos būsenos į plastišką būseną. Kaip jau prieš tai paminėtame (pav. 1.7) paveikslėlyje matome, jog pagrindu įrankiai yra skirstomi pagal galinio paviršiaus formą, bei kūgiškumą arba tiesumą skerspjūvyje.

Apibendrinant frikcinio virinimo įrankis turi dvi pagrindines dalis: kotą ir ašelę. Svarbiausia įrankio dalis yra ašelė, nes ji daro didžiausią įtaką virinimo patikimumui, stiprumui kokybei. Labai svarbus aspektas yra tarp įrankio ir virinamos medžiagos paviršiaus įrankio išgilinimo metu. Kaip ir anksčiau buvo paminėta, jog virinimo įrankis atlieka šias pagrindines funkcijas – pirmiausia išgilina į medžiagą, o pasiekusi reikiama gyli ji pradeda maišyti deformuotus paviršius ir taip juos sujungia nenutrūkstama jungtimi.

1.5 Frikcinio taškinio virinimo robotai

Šiais laikais bet kokia pramoninės gamybos linija yra neišsivaizduojama be automatizuotų gamybinių linijų. Ne išimtis yra frikcinio taškinio virinimo linijos. Tokiose gamybinėse linijose yra naudojami automatiniai virinimo robotai. Frikciniam taškiniam robotui galima pritaikyti ir paprasčiausius, rankos tipo robotus. Tokie robotai susideda iš standaus korpuso, elektrinių arba hidraulinių šaltinių, standartinių pavarų, variklių, bei žinoma specialios programinės įrangos, kurią atitinkamai užprogramavus pagal reikiamą detalę ir parinkus tinkamus režimus galime atlikti virinimo operacijas (pav. 1.8) [8].



1.8 pav. Rankos tipo suvirinimo robotas [8]

Taip pat yra ir kitas frikcinio taškinio virinimo robotų tipas. Tai yra vadinamieji C formos rėmo konfigūracijos tipo robotai. Pagrindinis skirtumas tarp prieš tai aprašyto įprastinio roboto ir C formos tipo roboto yra tai, jog robotui yra sumažinama apkrova. C forma robotui lankstumo. Įprastinė roboto veikimo sekas: 1 – C formos dalis juda link virinamos vietos, 2 – juda apatinė C formos dalis, 3 – prasideda įrankinio sukimasis ir įrankis pradeda judėti link medžiagos, 4 – įrankis palaikomas medžiagoje reikiamą laiką, kol sumaišo tinkamai medžiagas (iki tam tikros temperatūros), 5 – baigęs maišymo procesą įrankis ištraukiamas ir juda link kitos virinimo vietos (pav. 1.9)



1.9 pav. C konfigūracijos virinimo robotas [8]

Paprasciausi virinimo robotai yra tvirtinami standžiai prie stalo. Jie gali veikti tiek automatiškai, tiek rankiniu režimu. Jei norime, jog procesas vyktų automatiškai reikia suderinti automatinį detalių padavimą. Šio robotas puikiai tinka kai nėra didelio kiekio detalių, labiau skirtas vienetinei gamybai. Detalės padedamos ant stalo, tada operatorius su koja nuspaudžia padą ir tada prasideda virinimo procesas. Tokio tipo robotą galime matyti žemiau pateiktame paveikslėlyje (pav. 1.10)



1.10 pav. Rankinio virinimo robotas [8]

1.6 Frikcinio taškinio virinimo parametrai

Siekiant kokybiško frikcinio virinimo rezultato labai svarbūs yra virinimo parametrai. Pagrindiniai parametrai yra šie: koto sukimosi kampinis greitis, įrankio pavertimo kampas, ribinis atsparumas tempimui, estetinis vaizdas.

Koto sukimosi kampinis greitis – tai labai svarbus parametras, nes didinant sukimosi greitį paprastai sumažėja jėga reikalinga suvirinimui, tačiau negalima teigti, jog suvirinimo jėgos sumažėjimas nėra tiesiogiai proporcingas sukimosi greičiui, nes yra daug papildomų aspektų. Įrankio pavertimo kampas – didėjant įrankio pavertimo kampui proporcingai yra reikalinga didesnė virinimo jėga. Virinant vienodų storių medžiagas optimalus pavertimo kampas tvirtam virinimui yra nuo 1.5° iki 3° . Virinimas taip pat gali būti atliekamas 0° virinimo kampu. Tada yra naudojama minimali virinimo jėga, tačiau yra taip pat minimalus virinimo įrangos lankstumas ir gali būti žema virinimo kokybė. Ribinis atsparumas tempimui – labai svarbus parametras, kuriuo galime pasverti suvirinto

taško tempimo stiprumą. Estetinis vaizdas taip pat yra labai svarbus parametras, ypač automobilių pramonėje, kur virinimas matosi išoriniuose paviršiuose[9].

1.7 Aliuminio lydinių frikcinis taškinis virinimas

Frikcinis taškinis virinimas labiausiai yra naudojamas virinant aliuminio lydinius. Frikcinio taškinio virinimą tyrė šie mokslininkai: S.Babu, V. S. Sankar, G. D., Janaki Ram, P. V. Venkitakrisjnan Reddy, K. Prasad Rao (AA2014), S. H. Chowdhury, D.L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao, P. Wanjara. (5474), R. Karthikeyan, V. Balasubramanian. (AA2024). Aliuminis turi tokias pagrindines savybes: aliuminio gaminiai pasižymi savo lengvumu, paprastumu apdirbti, atsparus korozijai, didelis stiprumas (iki 700 MP), pakankamai lengvai leidžiasi formuojamas.

1.8 Atlikti frikcinio taškinio virinimo bandymai su aliuminio lydiniais

Prieš atliekant eksperimentinius bandymus pirmiausia buvo atlikta tam tikrų medžiagų analizė, su kuriomis jau buvo atlikti bandymai. Analizės tikslas – surinkti kuo daugiau informacijos. Svarbiausi pasirinkti analizės parametrai – storis, įrankio sukimosi greitis n , ašinė pastuma F_y . Atlikus analizę buvo surinkti tokie duomenys apie virinamas medžiagas, bei įrankius naudotus virinimo metu (1.1 lentelė).

1.1 Lentelė

Eil. Nr.	Medžiaga	Storis (mm)	Apsisukimai aps/min	Ašinė pastūma mm/min	Nuoroda
1	5754	1,6	1400	40	[10]
2	AA2014	3	1500	18,75	[11]
3	5754	2	2000	15	[12]
4	7075-T6	2	2000	21,9	[13]
5	2A12-T14	3	1200	40	[14]
6	AA 2024-T3	2,7	1400	20	[15]
7	Al 6061-T6	1	3000	24	[16]
8	5052	1	2256	40	[17]

1.9 Literatūros apžvalgos išvados

Atlikus literatūros apžvalgą frikcinio taškinio virinimo tematika galima teigti, jog kol kas tokio tipo virinimas gerokai skiriasi nuo tokių tradicinių virinimų būdų kaip - lankinis virinimas, dujinis virinimas. Frikcinis taškinis virinimo būdas kol kas yra labiau teorinis, nei praktinis, tačiau turintis didelių perspektyvų būti naudojamu plačiai pramonėje.

Suradus informaciją apie tai, dėmesys buvo sutelkiamas į frikcinio taškinio virinimo procesą, jo esmę, veikimo principą. Išnagrinėjus tai, buvo renkama informacija apie privalumus, bei trūkumus. Toliau buvo nagrinėjamos pagrindinės frikcinio virinimo įrankio sudedamos dalys – kotas (shoulder), bei ašelių (pin) tipai. Po to sekė informacijos rinkimas apie tai kokio tipo robotai yra naudojami, kokios jų savybės, aprašyti supaprastinti veikimo principai.

Išnagrinėjus prieš tai aprašytus aspektus sekė gilinimasis į frikcinio taškinio virinimo parametrus, aliuminių lydinius.

Galiausiai buvo surinkta informacija apie atliktus bandymus tiriant ašinę jėgą, bei momentą naudojantis moksliniais šaltiniais

2. Eksperimentinė dalis

2.1 Įvadas

Eksperimentinė aliuminio lydinių frikcinio suvirinimo proceso tyrimo dalis susidės iš dviejų tyrimų. Pirmojoje dalyje bus matuojamos ašinės jėgos, bei momentai atsirandantys virinimo metu, keičiant tokius parametrus kaip – pastūma, įrankio sukimosi greitis. Taip pat eksperimento metu bandymai bus atliekami su dvejomis medžiagomis. Antrojoje dalyje tirsime mikrostruktūras suvirintose zonose atlikdami šlifavimą ir poliravimą. Tam, jog tinkamai galėtume atlikti antrąjį eksperimentą ruošiniams atliksime šlifavimo, bei poliravimo operacijas. Bandymo metu naudosime skirtingo rūpumo šlifavimo diskus, bei poliravimo audeklus, nuo mažiau grūdėto iki labiausiai grūdėto.

2.2 Eksperimentinė įranga

Taškinio frikcinio virinimo bandymai buvo atliekami naudojant programinį (CNC) apdirbimo centrą. Bandymo metu buvo naudojamas 5 ašių apdirbimo centras Deckel Maho DMU 35M, kurio valdiklis yra Siemens 810D. Su šiuo valdymo pultu buvo parašyta programa skirta frikciniam taškiniam virinimui.

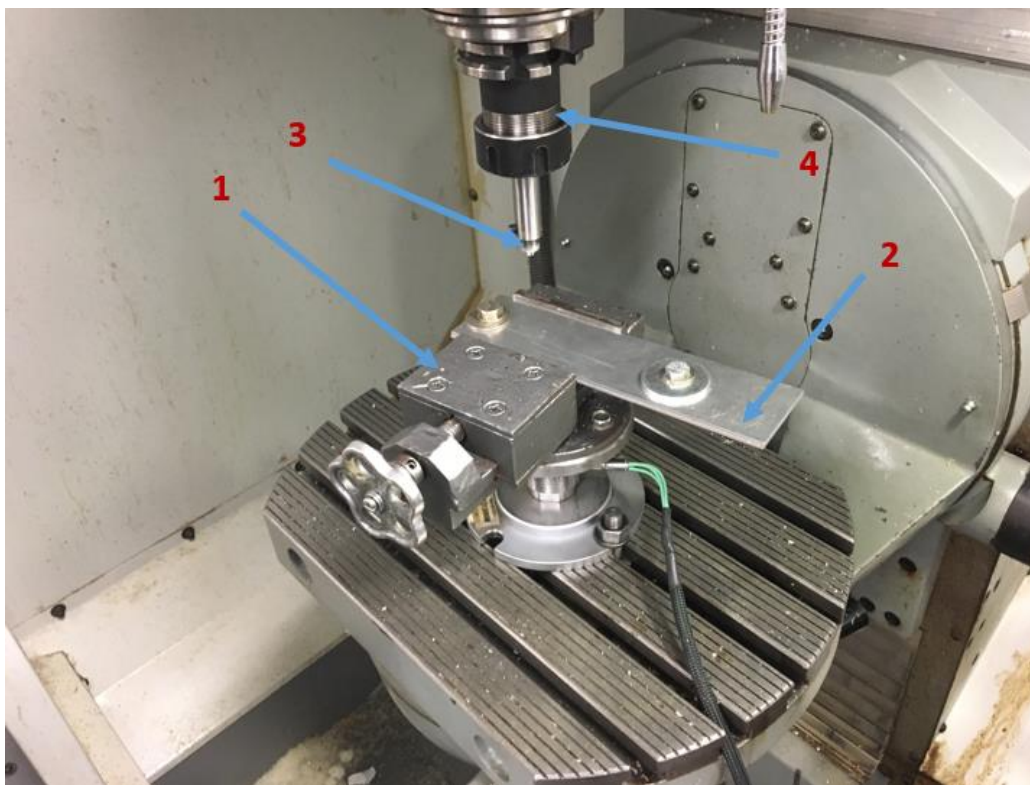
Bandymų metu buvo matuojama ašinė jėga, bei momentas Kistler 9345B dinamometru. Šio įrenginio veikimo principas yra toks, jog jis matuoja poslinkio kitimą. Šio dinamometro matavimo ribos matuojant ašinę jėgą yra - 0...10 kN, o jautrumas yra lygus - 3,726 pC/N. Kai matuojame momentą virinimo metu tada jo matavimo ribos yra tokios - 0...25 Nm, o jautrumas yra lygus -189,7 pC/Nm. Ašinių jėgų, bei momentų pokytis yra matuojamas „Picoscope 4024“ pagalba. Bandymų rezultatų duomenys yra įrašomi į kompiuteri naudojantis „Picoscope 6“ programa. Gauti duomenys įrašomi į kompiuteri naudojantis „Picoscope 6“ programa.

Eksperimentinio bandymo įranga pavaizduota (Pav. 2.1). Ši įranga susideda iš: 1 – programinio (CNC) apdirbimo centro Deckel Maho DMU 35M, 2 – spaustuvo, 3 – Kistler 9345B dinamometro, 4 – „Picoscope 4024“ oksiloskopas, 5 – nešiojamo kompiuterio su „Picoscope 6“ programa.



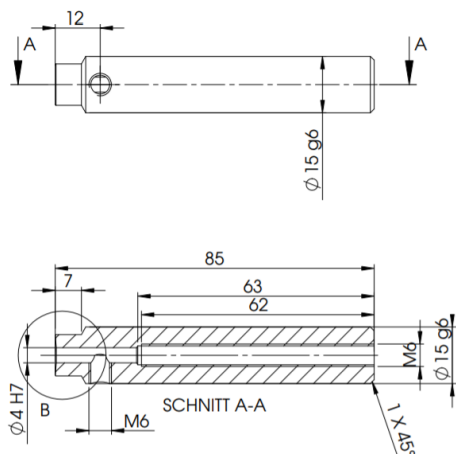
2.1 pav. Eksperimentinio bandymo įranga

Detalizuotas spaustuvo su suvirinamais ruošiniais, bei įrankiais vaizdas pateiktas (Pav. 2.2). Čia pavaizduota – 1 – spaustuvas, 2 – virinami ruošiniai, 3 – ašelė, 4 – špindelėlis.



2.2 pav. Detalizuotas virinimo zonos vaizdas

Bandymų metu ašelė buvo įdedama į laikiklį, kuris buvo pagamintas iš greitapjūvio plieno 1.2343. Įrankis yra sudarytas iš 3 dalių – ašelės, 11 mm skersmens cilindru ir tvirtinimo smeigės. Įrankio vaizdas yra pateiktas (2.3 pav. a – įrankio vaizdas su matmenimis, 2.3 pav. b – įrankio erdvinis vaizdas)



2.3 pav. a) Laikiklis su matmenimis

2.3 pav. b) Laikiklio erdvinis modelis

Bandymai buvo atliekami su dviejų tipų ašelėmis – trikampe (Pav. 2.4 a), bei keturkampe (Pav. 2.4 b).



2.4 pav. a) Laikiklis su trikampi profiliu

2.4 pav. b) Laikiklis su keturkampi profiliu

Mikrošlifai buvo atliekami naudojant LAMPLAN gamintojo SMARTLAM 2.0 poliravimo – šlifavimo įrenginį (2.5 Pav.) [18].



2.5 pav. SMARTLAM 2.0 poliravimo – šlifavimo įrengimas

2.3 Medžiagų mikrostruktūrų tyrimas

Atlikus taškinio frikcinio suvirinimo proceso bandymus su 5 ašių apdirbimo centru Deckel Maho DMU 35M perpjovėme ruošinius per jų suvirinimo taškų centrus (Pav. 2.6) su viela, elektroerozinių staklių pagalba tam, jog galėtume atlikti AlMg3W19, bei TL091-T4 aliuminio lydinių mikrostruktūrų tyrimą.



2.6 pav. AlMg3W19 aliuminio ruošinys perpjautas per virinimo taškus su viela, elektroerozinių staklių pagalba

Perpjovę ruošinius per jų virinimo taškų centrus papildomai atpjovėme mažesnius ruošinius, jog galėtume juos tinkamai įtvirtinti šlifavimo – poliravimo įrenginyje. Susmulkinus ruošinius taip, jog jiems nebūtų pažeistos virinimo zonos jie buvo patalpinti į apvalaus vamzdžio vidų, o vamzdis buvo pripildytas epoksidine Inter Troton Repair Set derva (Pav. 2.7)



2.7 pav. Aliuminio ruošiniai patalpinti epoksidinėje dervoje

Sudžiūvus ruošiniams epoksidinėje dervoje atlikome ruošinių paviršių šlifavimą, bei poliravimą. Šie procesai buvo atliekami naudojant LAMPLAN gamintojo SMARTLAM 2.0 poliravimo – šlifavimo įrenginį.

Šiuo įrenginiu galima šlifuoti, poliruoti tokias medžiagas – plieną, titaną, bronzą, aliuminį, plastiką ir kitas panašias medžiagas. Šio darbo metu buvo šlifuotas, bei poliruotas aliuminis. Šis procesas vyko tokia tvarka – pirmiausia ant šlifavimo disko buvo užklijuotas 600 rupumo šlifavimo popierius, disko sukimosi greitis buvo 300 aps/min, o visas šlifavimo laikas tokio rupumo popieriumi užtruko 5 minutes. Po to vietoj prieš to naudoto popieriaus buvo užklijuotas 1500 rupumo šlifavimo popierius, disko sukimosi greitis buvo 300 aps/min, o visas šlifavimo laikas tokio rupumo popieriumi užtruko 5 minutes. Paskutinis šlifavimo popierius buvo 2500 rupumo, disko sukimosi greitis buvo 300 aps/min, o visas šlifavimo laikas tokio rupumo popieriumi užtruko taip pat 5 minutes. Atlikus šlifavimo operaciją, atlikome poliravimo operaciją. Poliravimo metu buvo naudojamas poliravimo audeklas, o ant jo buvo užtepta poliravimo pasta Neodia Diamond Liquid, o disko sukimosi greitis buvo 300 aps/min, o visas poliravimo laikas užtruko 15 minučių. Atlikus prieš tai išvardintas operacijas užtepėme Kelerio ryškinimo skysčio ant tiriamo paviršiaus, jog galėtume išryškinti virinimo zonas. Atlikus ryškinimą, dar užtepėme spirito, jog panaikintume mikro įbrėžimus ir galėtume tirti paviršius. Mikrostruktūros buvo tiriamos mikroskopu.

2.4 Medžiagų charakteristikos

Pirmoji medžiaga, tai AlMg3W19 aliuminio lydinys. Jos cheminė sudėtis (2.1 lentelė) lentelėje [19]:

2.1 Lentelė

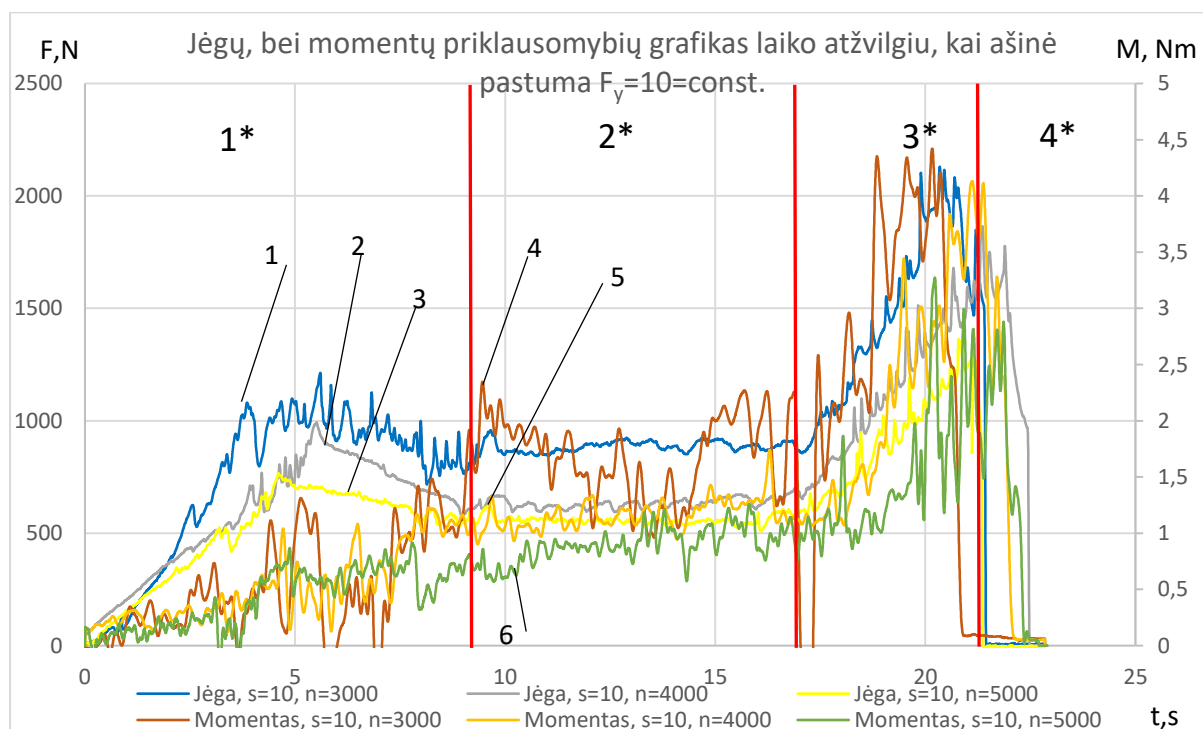
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Kitos
95,25%	0,40%	0,40%	0,10%	0,50%	2,60-3,40%	0,30%	0,20%	0,15%	0,10%-0,60%

Antroji medžiaga, tai TL091-T4 aliuminio lydinys. Jos cheminė sudėtis (2.2 lentelė) lentelėje [20]:

2.2 Lentelė

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Kitos
92%	0,25%	0,40%	0,10%	0,60%- 1,00%	5,00%- 5,5%	0,05%- 0,20%	0,20%	0,05%- 0,20%	0,0003%	0,05%

2.5 Eksperimentinių rezultatų analizė



2.8 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav. 2.8) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

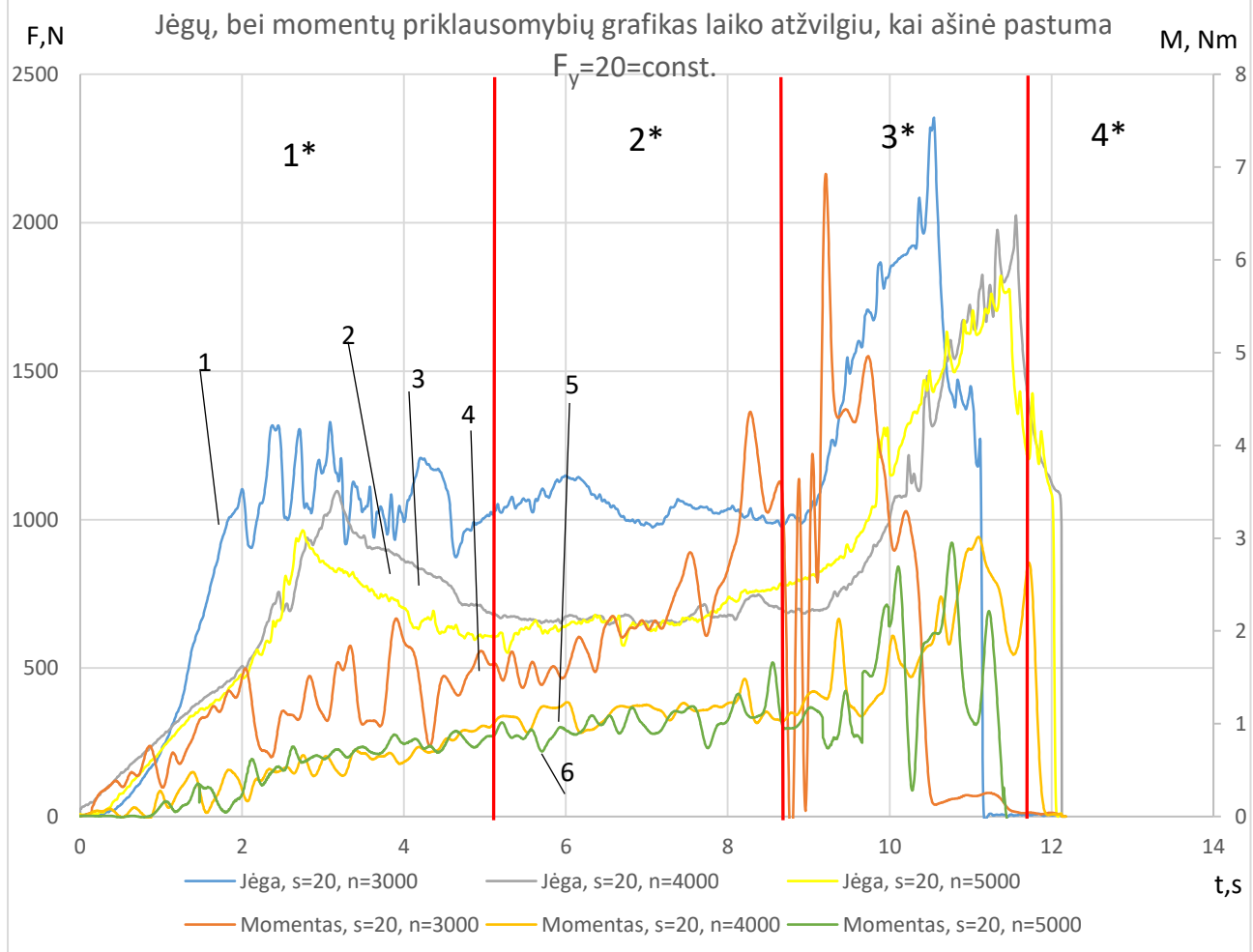
Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.8), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 2129N, o didžiausias momentas yra 4,42 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.8), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1865N, o didžiausias momentas yra 4,13 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.8), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1364N, o didžiausias momentas yra 3,27 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą, tai rodo (2.3 lentelė).

2.3 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	10	3000	2129	4,42
2	AlMg3W19	10	4000	1865	4,13
3	AlMg3W19	10	5000	1364	3,27



2.9 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav.2.9) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš

tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

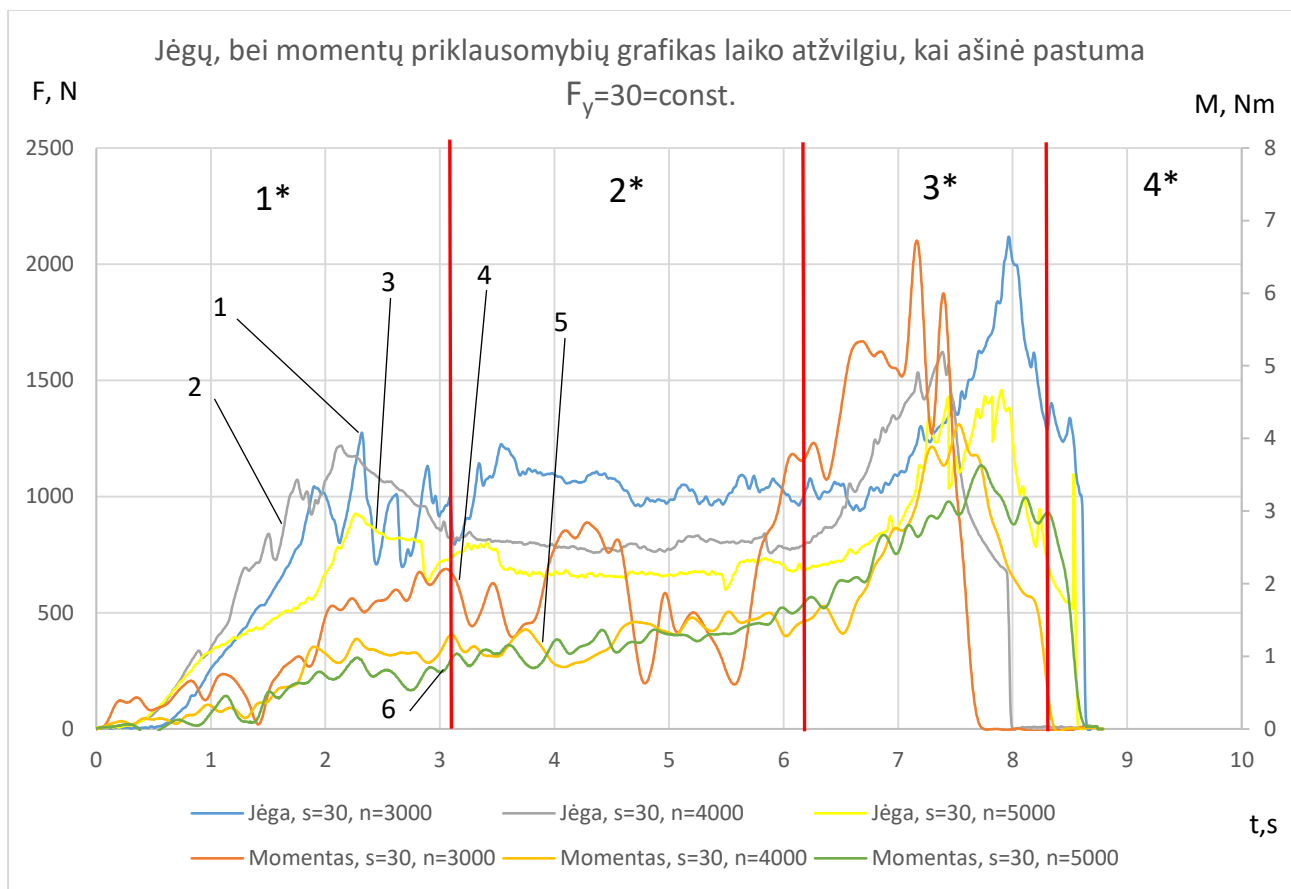
Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.9), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 2353N, o didžiausias momentas yra 6,92Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.9), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 2025N, o didžiausias momentas yra 3,01 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.9), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1822N, o didžiausias momentas yra 2,95 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą, tai rodo (2.4 lentelė).

2.4 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	20	3000	2353	6,92
2	AlMg3W19	20	4000	2025	3,01
3	AlMg3W19	20	5000	1822	2,95



2.10 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav. 2.10) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip:

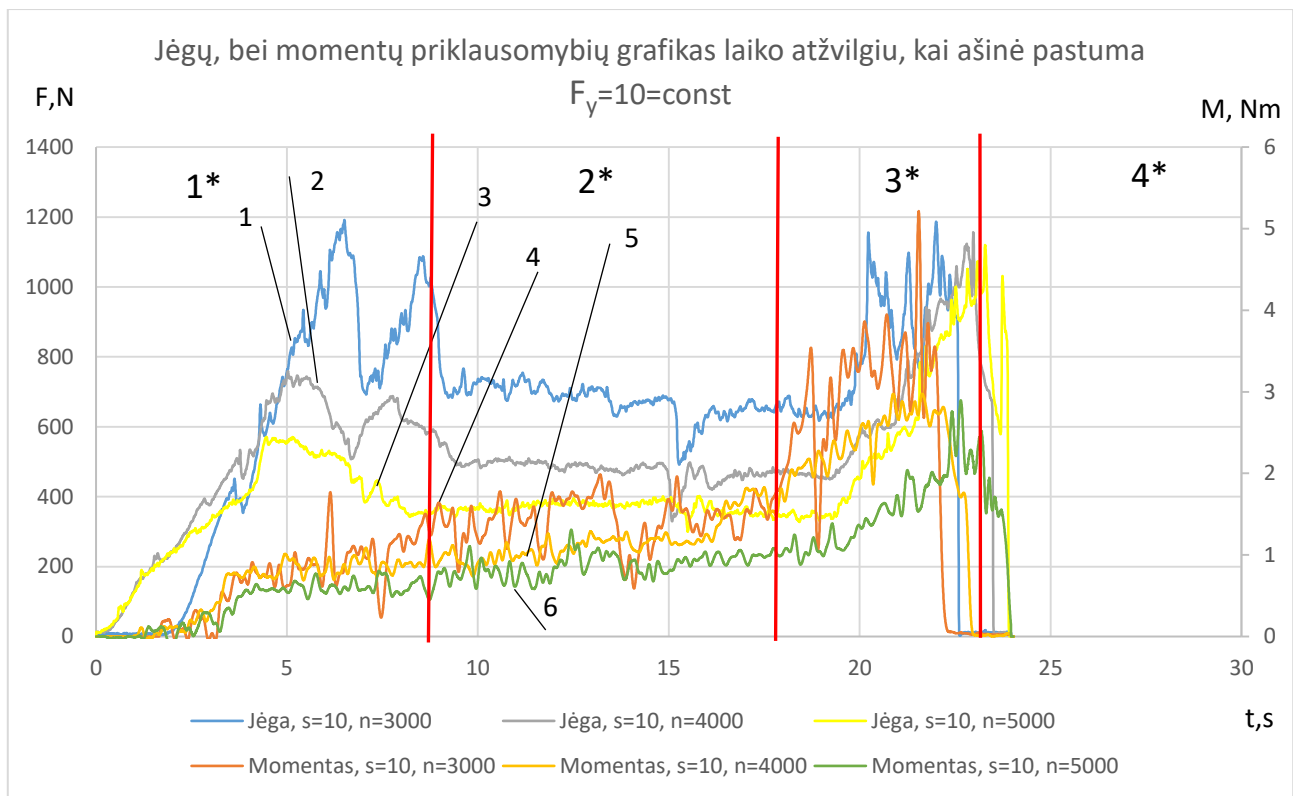
įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.10), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 2118N, o didžiausias momentas yra 6,72 Nm . Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.10), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1622N , o didžiausias momentas yra 4,19 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.10), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1458N, o didžiausias momentas yra 3,62 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą, tai atvaizduota (2.5 lentelėje).

2.5 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	30	3000	2118	6,72
2	AlMg3W19	30	4000	1622	4,19
3	AlMg3W19	30	5000	1458	3,62



2.11 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav. 2.11) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie

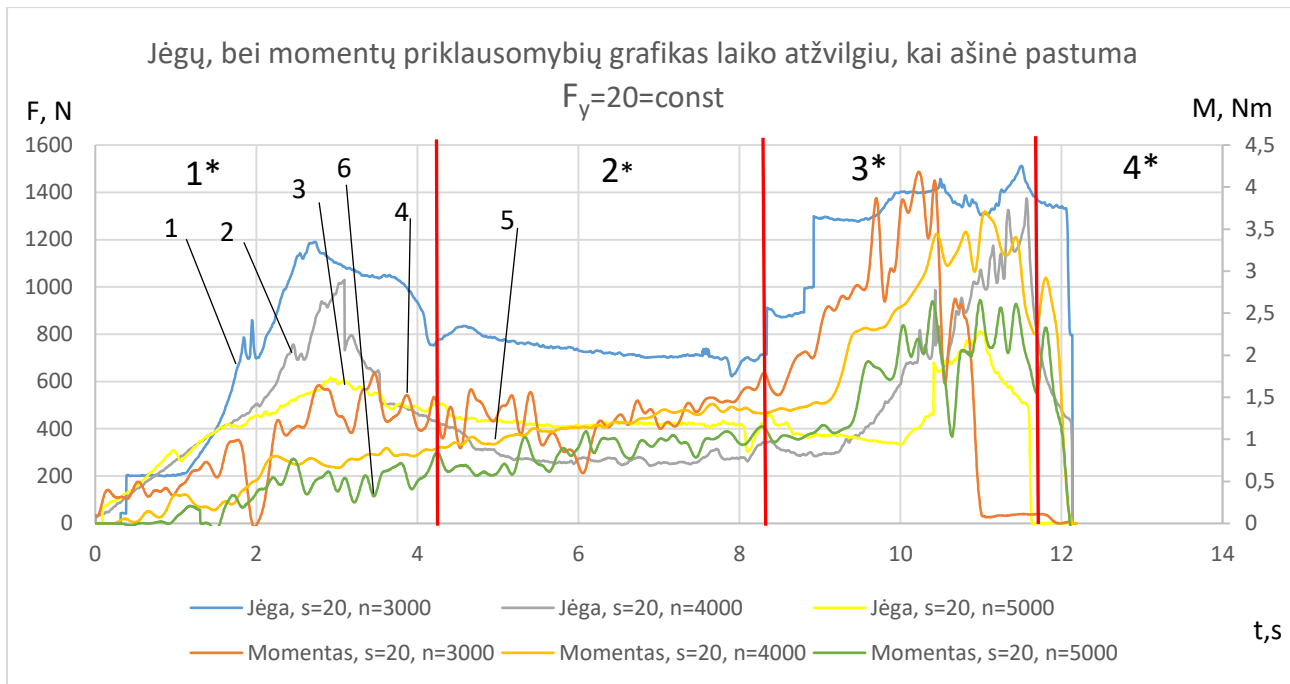
virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.11), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1191N, o didžiausias momentas yra 5,21 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.11), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1156N, o didžiausias momentas yra 2,97 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.11), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1119N, o didžiausias momentas yra 1,15 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.6 lentelė).

2.6 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	10	3000	1191	5,21
2	TL091-T4	10	4000	1156	2,97
3	TL091-T4	10	5000	1119	1,15



2.12 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav. 2.12) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome,

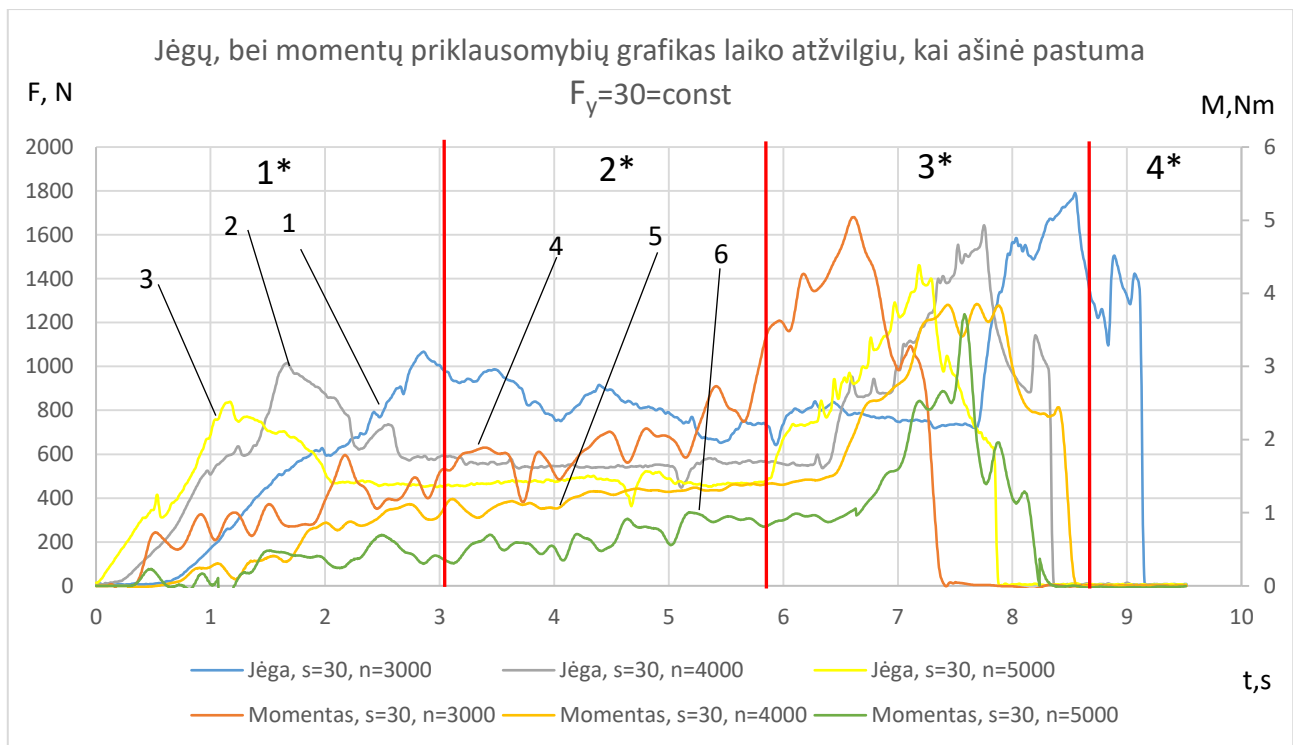
jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.12), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1511N, o didžiausias momentas yra 4,18 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.12), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1375N, o didžiausias momentas yra 3,71 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.12), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 811N, o didžiausias momentas yra 2,65 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.7 lentelė).

2.7 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	20	3000	1511	4,18
2	TL091-T4	20	4000	1375	3,71
3	TL091-T4	20	5000	811	2,65



2.13 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – trikampis.

Šiame grafike (Pav. 2.13) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau

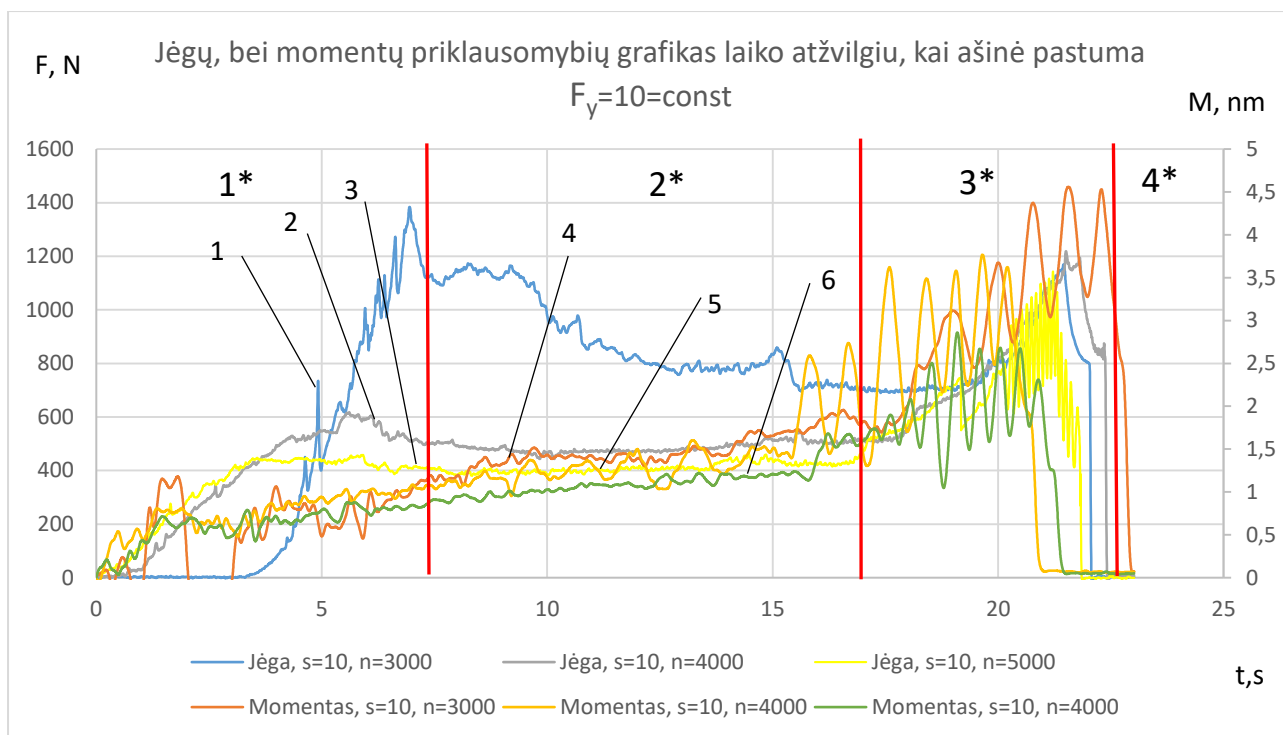
momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.13), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1791N, o didžiausias momentas yra 5,04 Nm . Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.13), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1644N , o didžiausias momentas yra 3,85 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.13), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1461N, o didžiausias momentas yra 3,71 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą, tai pavaizduota (2.8 lentelėje).

2.8 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	30	3000	1791	5,04
2	TL091-T4	30	4000	1644	3,85
3	TL091-T4	30	5000	1461	3,71



2.14 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.14) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome,

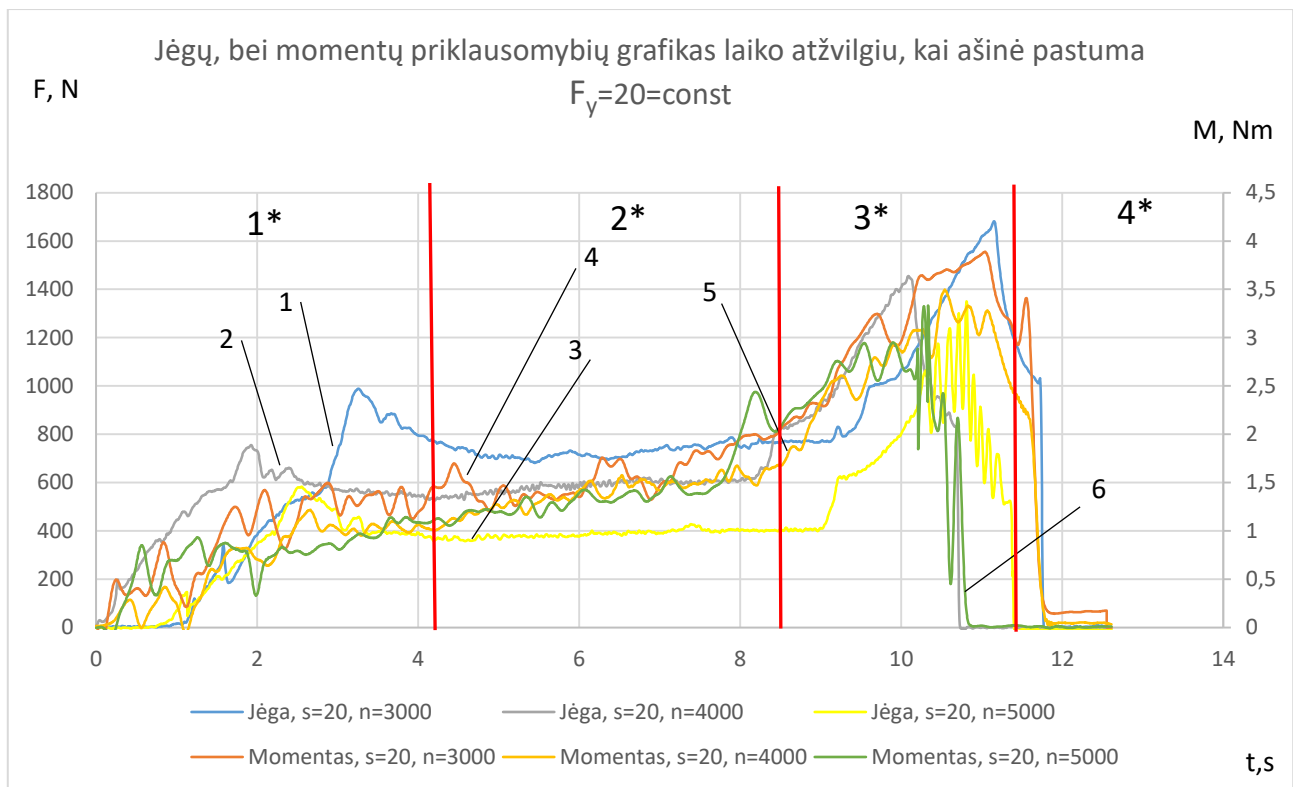
jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.14), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1383N, o didžiausias momentas yra 4,56 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.14), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1218N, o didžiausias momentas yra 3,76 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.14), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1142N, o didžiausias momentas yra 2,86 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.9 lentelė).

2.9 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	10	3000	1383	4,56
2	TL091-T4	10	4000	1218	3,76
3	TL091-T4	10	5000	1142	2,86



2.15 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.15) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydytis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau

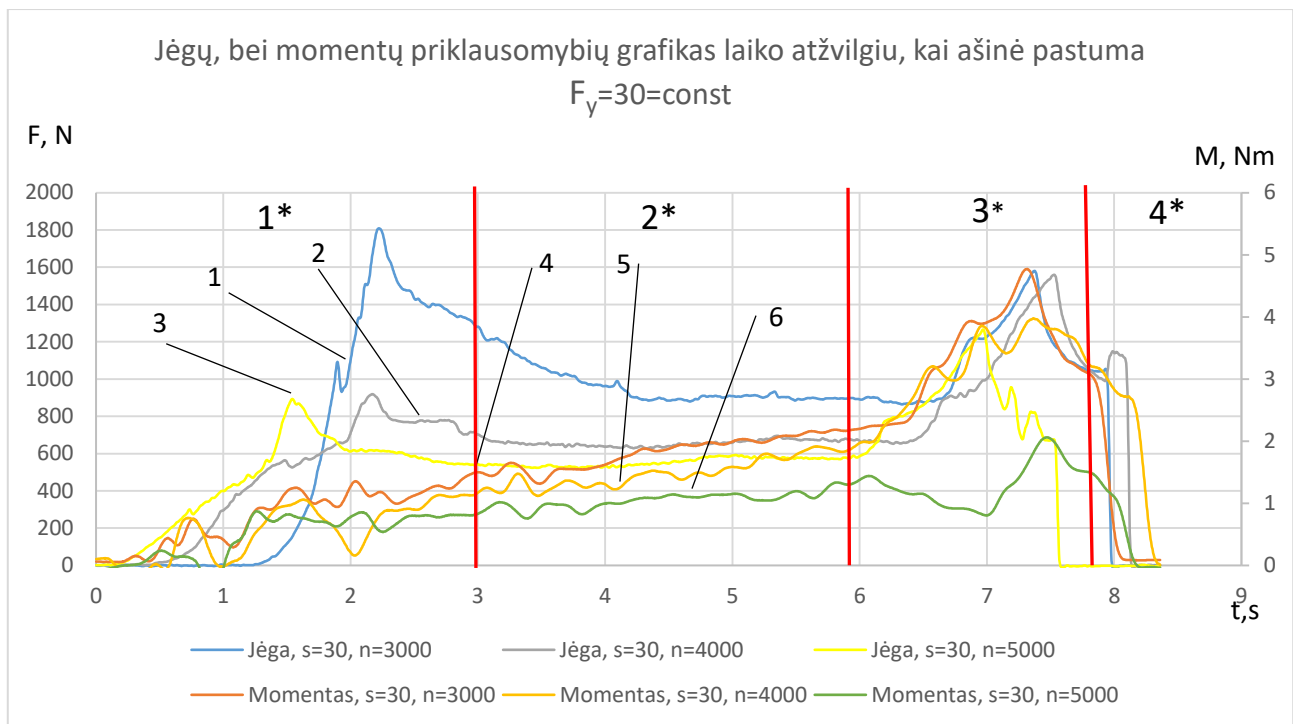
momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.15), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1681 N, o didžiausias momentas yra 3,88 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.15), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1454 N, o didžiausias momentas yra 3,49 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.15), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1350N, o didžiausias momentas yra 3,33 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.10 lentelė).

2.10 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	20	3000	1681	3,88
2	TL091-T4	20	4000	1454	3,49
3	TL091-T4	20	5000	1350	3,33



2.16 pav. TL091-T4 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.16) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydytis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome,

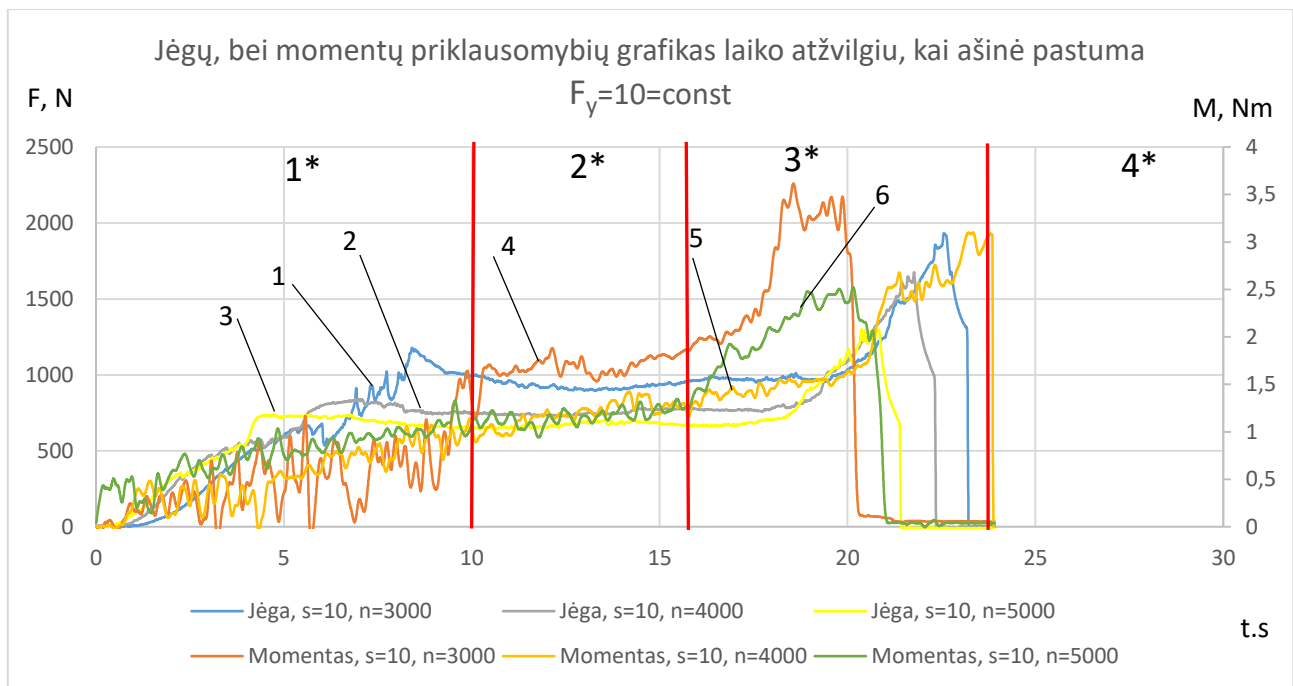
jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.16), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1808N, o didžiausias momentas yra 4,77 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.16), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1559N, o didžiausias momentas yra 3,97 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.16), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1266N, o didžiausias momentas yra 2,06 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.11 lentelė).

2.11 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	TL091-T4	30	3000	1808	4,77
2	TL091-T4	30	4000	1559	3,97
3	TL091-T4	30	5000	1266	2,06



2.17 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.17) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome,

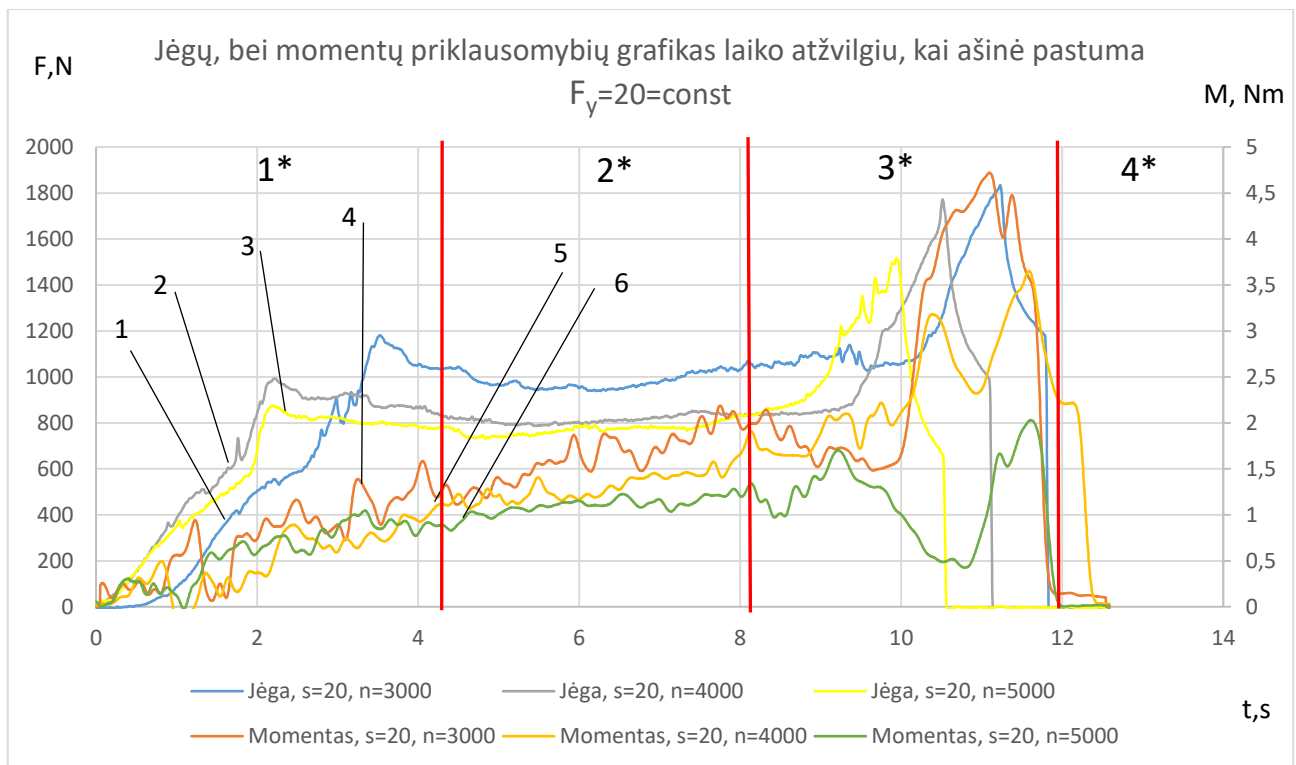
jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.17), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1993N, o didžiausias momentas yra 3,61 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.17), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1675N, o didžiausias momentas yra 3,09 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.17), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1300N, o didžiausias momentas yra 2,52 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.11 lentelė).

2.11 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	10	3000	1933	3,61
2	AlMg3W19	10	4000	1675	3,09
3	AlMg3W19	10	5000	1300	2,52



2.18 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.18) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastumą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastumą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau

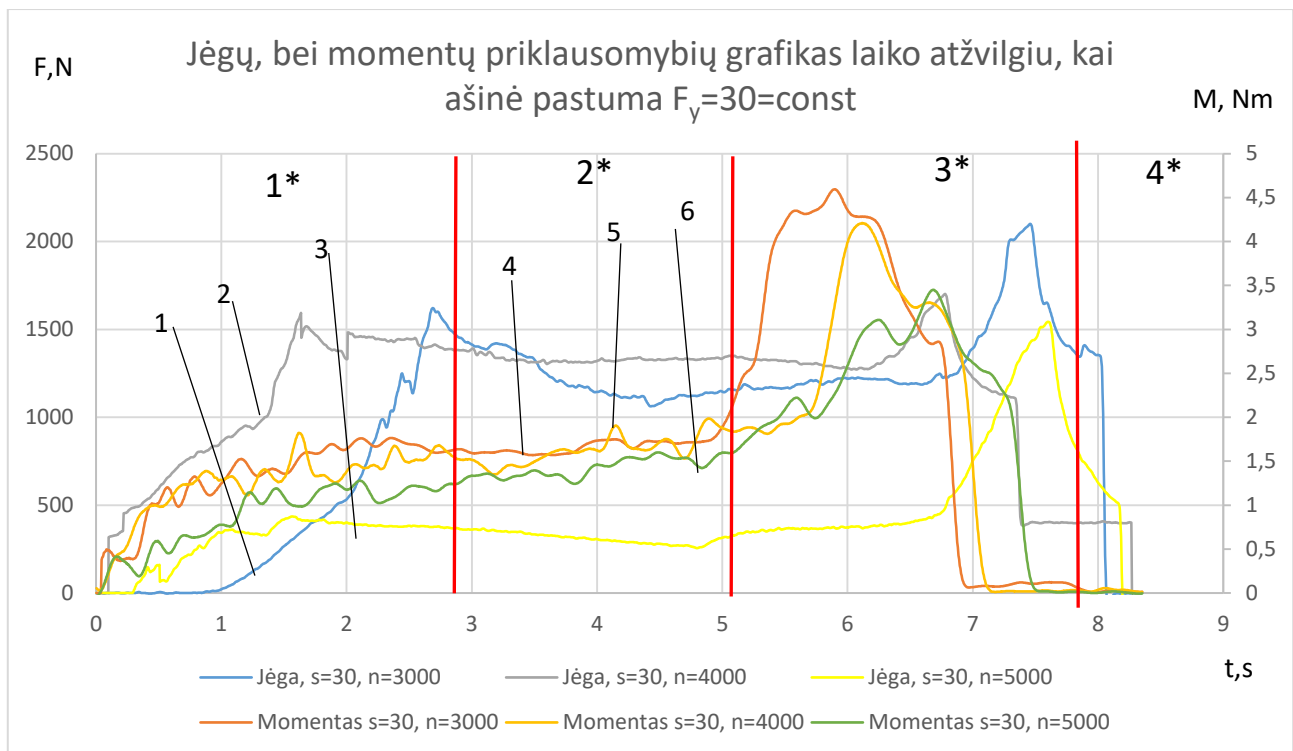
momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.18), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1834N, o didžiausias momentas yra 4,72 Nm . Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.18), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1772N , o didžiausias momentas yra 3,65 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.18), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1517N, o didžiausias momentas yra 2,03 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.12 lentelė).

2.12 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	20	3000	1834	4,72
2	AlMg3W19	20	4000	1772	3,65
3	AlMg3W19	20	5000	1517	2,03



2.19 pav. AlMg3W19 aliuminio lydinio virinimo metu atsirandančios ašinių jėgų ir momentų priklausomybės nuo laiko, kai įrankio tipas – keturkampis.

Šiame grafike (Pav. 2.19) pavaizduotos ašinių jėgų ir momentų atsirandančių virinimo proceso metu priklausomybės laiko atžvilgiu, kai įrankio sukimosi greitis kiekvieno bandymo metu yra didinamas kas 1000 aps/min. Intervale nuo 3000 aps/min iki 5000 aps/min. Įrankio pastūma kiekvieno bandymo metu yra pastovi ir lygi 10 mm/min. Pirmojo bandymo metu nustatome ašinę pastūmą taip, jog jos reikšmė būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę nustatome taip, jog ji būtų lygi 3000 aps/min. Antrojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią kaip prieš tai buvusių bandymų metu, jog jos reikšmė vėl būtų lygi 10 mm/min o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 4000 aps/min. Trečiojo bandymo metu ašinę pastūmą paliekame tokią pačią, o įrankio sukimosi greičio reikšmę padidiname dar 1000 aps/min taip, jog ji būtų lygi 5000 aps/min.

Analizuodami pateikta grafiką galime išskirti tris procesus kurie vyksta taškinio frikcinio metu. Tai yra – įsigilinimas, maišymas, ištraukimas. Grafike šios zonos yra pažymėtos taip: įsigilinimas – (1*), maišymas (2*), ištraukimas (3*), įrankis visai ištrauktas (4*). Pirmojoje zonoje (1*) kur vyksta įsigilinimas matome, jog vyksta staigus jėgų ir momentų verčių kilimas. Antrojoje zonoje (2*) kur vyksta maišymas matome, jog vyksta nedidelis jėgų verčių kritimas, nes tada apie virinimo įrankį esantis aliuminis ima lydėtis. Todėl ruošinį veikia mažesnės ašinės jėgos. Tačiau

momentai palaipsniui didėja. Trečiojoje zonoje (3*) vyksta įrankio ištraukimas. Šioje zonoje matome, jog vyksta labai staigus jėgų ir momentų verčių kilimas, tai galima sieti su išlydytos medžiagos aplink įrankį išmetimu. Ketvirtojoje zonoje (4*) įrankis yra visai ištraukiamas, todėl ašinės jėgos ir momentai drastiškai krinta.

Pirmojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.19), kreivėje (1) ir kreivėje (4), kai įrankio sukimosi greitis yra 3000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 2100N, o didžiausias momentas yra 4,59 Nm. Antrojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.19), kreivėje (2) ir kreivėje (5), kai įrankio sukimosi greitis yra 4000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1701N, o didžiausias momentas yra 4,21 Nm. Trečiojo bandymo metu, kurio rezultatai pavaizduoti (Pav. 2.19), kreivėje (3) ir kreivėje (6), kai įrankio sukimosi greitis yra 5000 aps/min, o ašinė pastūma yra lygi 10 mm/min didžiausia ašinė jėga yra 1543N, o didžiausias momentas yra 3,45 Nm.

Šie rezultatai rodo tai, jog kai turime nustatę mažiausius įrankio apsisukimus 3000 aps/min tada yra didžiausia ašinė jėga ir momentas, o kai turime didžiausius įrankio apsisukimus 5000 aps/min tada turime mažiausią ašinę jėgą ir momentą (2.13 lentelė)

2.13 Lentelė

Bandymo Nr.	Medžiaga	Ašinė pastūma (mm/min)	Įrankio sukimosi greitis (aps/min)	Ašinė jėga (N)	Momentas (Nm)
1	AlMg3W19	30	3000	2100	4,59
2	AlMg3W19	30	4000	1701	4,21
3	AlMg3W19	30	5000	1543	3,45

2.6 Suvirintų lydinių mikrostruktūrų tyrimų rezultatų analizė

Pagrindinis antrosios eksperimentinės dalies tikslas yra ištirti pakitusią ruošinių mikrostruktūrą suvirinimo proceso metu. Po virinimo išryškėja keturios pagrindinės virinimo zonos

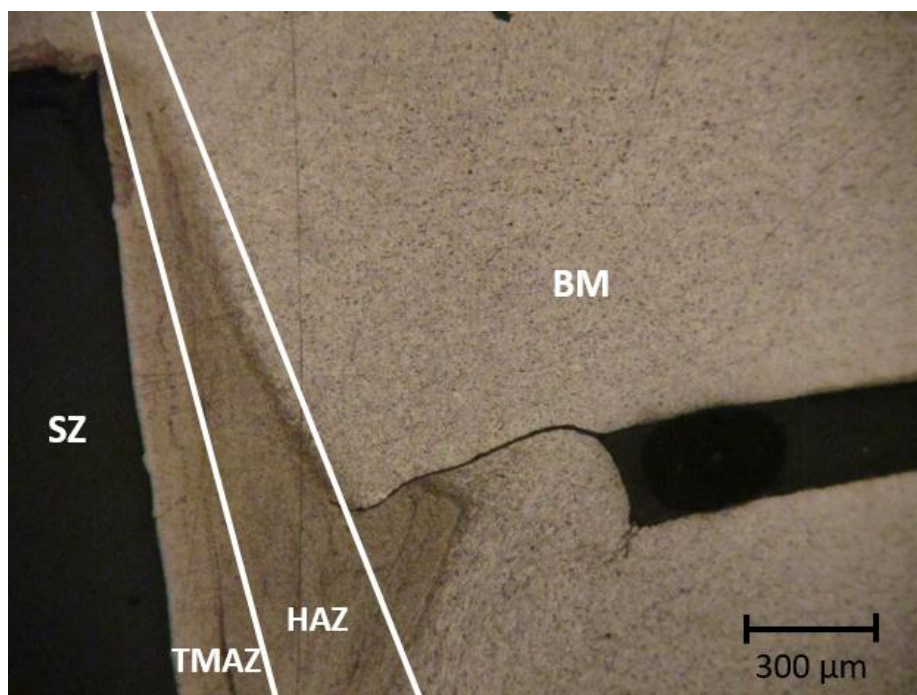
BM – (Base Material) tai zona kuri yra mažiausiai veikiamą taškinio frikcinio virinimo, todėl priimame, jog ši zona nėra paveikta terminiu poveikiu. Į šią zoną pakliūva abu aliuminio ruošiniai – apatinis, bei viršutinis.

HAZ – (Heat Affected Zone) tai zona kuri yra termiškai paveikta. Ši zona yra arčiau virinimo vietos, nei 1 zona, todėl šioje zonoje dalinai pasikeičia medžiagų struktūros, bei savybės.

TMAZ – (Thermo-Mechanically Affected Zone) tai terminio mechaninio poveikio zona. Ši zona yra dar arčiau virinimo zonos, todėl šioje zonoje atsiranda dideli medžiagos struktūrų, bei savybių pakitimai. Taip pat atsiranda plastinės deformacijos.

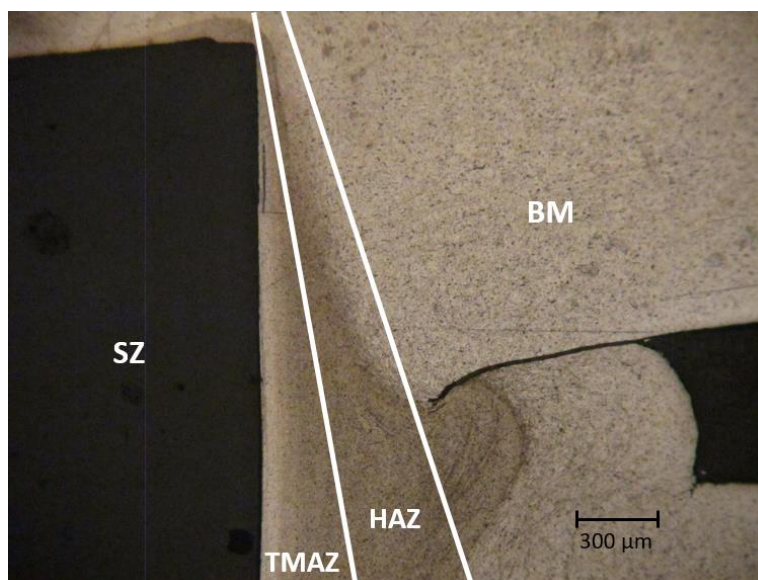
SZ – (Stir Zone) tai zona kuri yra labiausiai deformuojama. Šioje zonoje dvi medžiagos yra sumaišomos, sujungiamos mikrostruktūros, atsiranda labai dideli savybių pakitimai, bei plastinės deformacijos.

Pateiktame paveikslėlyje (Pav. 2.20) pavaizduotos prieš tai aprašytos virinimo zonos. Šis ruošinys yra iš TL091-T4 aliuminio lydinio. Įrankio sukimosi greitis virinimo metu buvo 3000 aps/min, o įrankio ašinė pastūma lygi 20 mm/min. Įrankio tipas – trikampis.



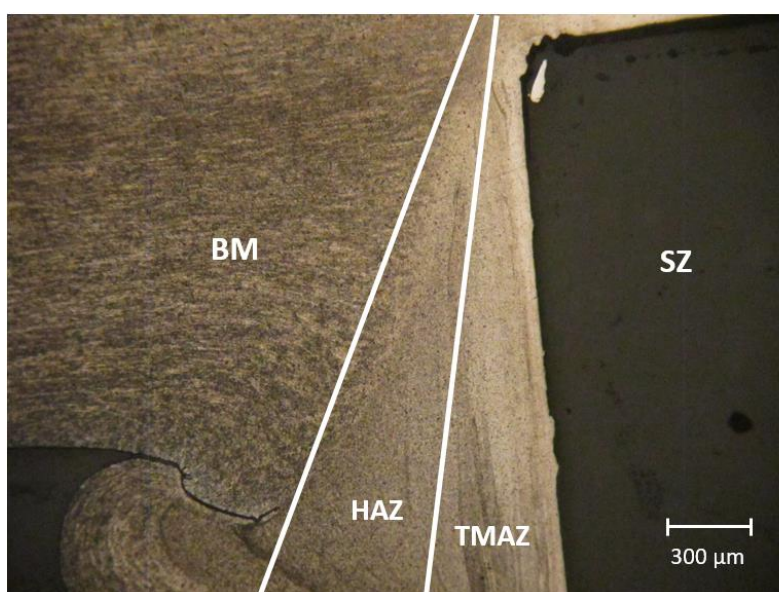
2.20 pav. Pagrindinės frikcinio taškinio virinimo zonos

Paveikslėlyje (Pav. 2.21) pavaizduotos ruošinys yra iš TL091-T4 aliuminio lydinio. Įrankio sukimosi greitis virinimo metu buvo 3000 aps/min, o įrankio ašinė pastūma lygi 20 mm/min, tačiau įrankio tipas – keturkampis.



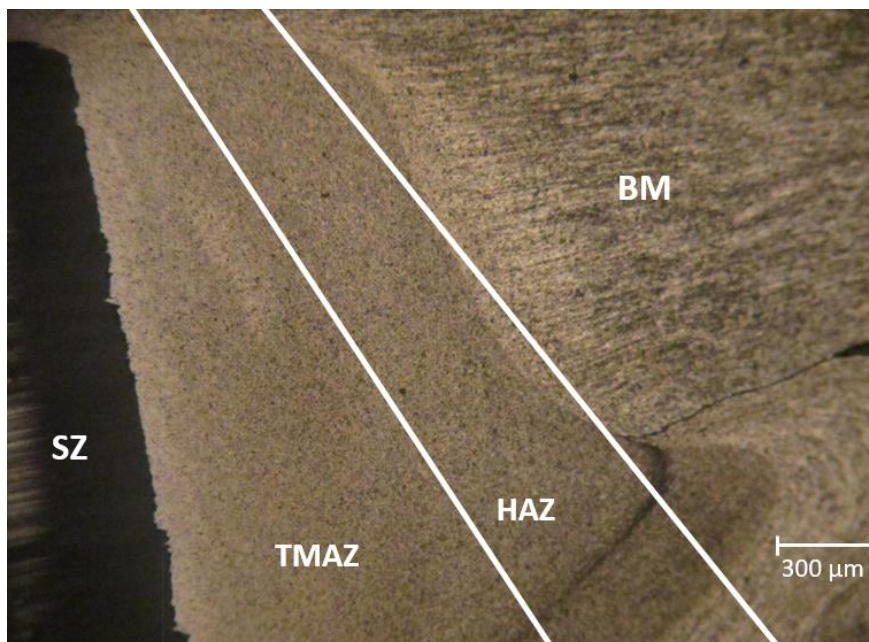
2.21 pav. Pagrindinės frikcinio taškinio virinimo zonos

Paveikslėlyje (Pav. 2.22) pavaizduotos ruošinys yra iš AlMg3W19 aliuminio lydinio. Įrankio sukimosi greitis virinimo metu buvo 3000 aps/min, o įrankio ašinė pastūma lygi 20 mm/min, įrankio tipas – trikampis.



2.22 pav. Pagrindinės frikcinio taškinio virinimo zonos

Paveikslėlyje (Pav. 2.23) pavaizduotos ruošinys yra iš AlMg3W19 aliuminio lydinio. Įrankio sukimosi greitis virinimo metu buvo 3000 aps/min, o įrankio ašinė pastūma lygi 20 mm/min, įrankio tipas – keturkampis.



2.23 pav. Pagrindinės frikcinio taškinio virinimo zonos

Atlikus virinimo zonų tyrimus galime teigti, jog TL091-T4 aliuminio lydinio terminio poveikito HAZ (Heat Affected Zone) zona yra didesnė, nei AlMg3W19 aliuminio lydinio, nes TL091-T4 aliuminio lydinio terminis laidumas yra didesnis, nei AlMg3W19 aliuminio lydinio. TL091-T4 aliuminio lydinio terminis laidumas yra 190 W/m-k [21], o AlMg3W19 aliuminio lydinio terminis laidumas yra 130 W/m-k [22].

2.7 Statistinė sklaidos analizė Anova

Norėdami palyginti eksperimentinių bandymų rezultatus su teoriškai apskaičiuotais rezultatais taikysime parametų sklaidos analizę – ANOVA. Tai toks metodas, kuris yra naudojamas gautų eksperimentinių rezultatų sklaidos analizei. Atlikę šią analizę galime nustatyti statistinių charakteristikų sklaidą ir daryti išvadas apie svarbiausius virinimo parametrus. Šį metodą sukūrė G.Tagučio [23].

Atliekant statistinių charakteristikų sklaidos analizę buvo pasirinkti tokie parametrai – įrankio sukimosi greitis n , ašinė pastūma F_y , bei ašinė jėga.

Šiuos parametrus aprašo 1 formulė.

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$$

1

kur X_1 ir X_2 – nepriklausomi kintamieji; a_0 , a_1 ir a_2 regresijos koeficientai

Pirmiausia statistinė ANOVA analizė buvo atliekama su AlMg3W19 virinimo metu gautomis jėgomis.

2.14 lentelė. AlMg3W19 medžiagos sklaidos parametrai.

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F - kriterijus</i>	<i>Įtaka F</i>
Kintamieji	2	1038182	519091	11,121	$2,03 \cdot 10^{-04}$
Sąveiką	15	419396,2	27959,75		
Viso	17	1457578	547050,75	11,121	$2,03 \cdot 10^{-04}$

2.15 lentelė. Regresinės analizės koeficientų analizė.

	<i>Koeficientas</i>	<i>Standartinė nuokrypa</i>	<i>t Stat</i>	<i>Įtaka</i>	<i>Apatinė riba 95%</i>	<i>Viršutinė riba 95%</i>
Intercept	2926,72	219,43	13,34	$1,01 \cdot 10^{-9}$	2459	3394,44
Kintamasis X_1 (n)	-0,293	0,048	-6,08	$2,1 \cdot 10^{-5}$	-0,396	-0,191
Kintamasis X_2 (F_y)	1,8	4,82	0,372	0,714	-8,48	12,09

Atlikus statistinę analizę matome, jog ašinė pastūma turi didesnę įtaką jėgai, nei sukimosi greitis n. Tai galime apskaičiuoti 2 formule.

$$F_s = 2926,72 - 0,293 \cdot n - 1,8 \cdot F_y$$

2

kur F_s – suvirinimo jėga; n – įrankio sukimosi greitis; F_y – pastūma

Naudojant 2 formulę apskaičiavome jėgas ir jas surašėme į 2.16 lentelę palyginimui.

2.16 lentelė. Eksperimentinių ir apskaičiuotų jėgų palyginimas

Nr	Medžiaga	Įrankio tipas	Apsisukimai (aps/min)	Pastūma (mm/min)	Ašinė jėga F (N)	Apskaičiuot a ašinė jėga (N)
1	AlMg3W19	Trikampis	3000	10	2129	2065
2			3000	20	2353	2083
3			3000	30	2118	2101
4			4000	10	1865	1772
5			4000	20	2025	1790
6			4000	30	1622	1808
7			5000	10	1364	1479
8			5000	20	1822	1497
9			5000	30	1458	1515
10	AlMg3W19	Keturkampis	3000	10	1993	2065
11			3000	20	1834	2083
12			3000	30	2100	2101
13			4000	10	1675	1772
14			4000	20	1772	1790
15			4000	30	1701	1808
16			5000	10	1300	1479
17			5000	20	1517	1497
18			5000	30	1543	1515

Sekanti statistinė ANOVA analizė buvo atliekama su TL091-T4 virinimo metu gautomis jėgomis.

2.17 lentelė. TL091-T4 medžiagos sklaidos parametrai.

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F - kriterijus</i>	<i>Įtaka F</i>
Kintamieji	2	857754,7	428877,3	22,17	$3,31 \cdot 10^{-05}$
Sąveiką	15	290127,8	19341,85		
Viso	17	1147882	448219,15	22,17	$3,31 \cdot 10^{-05}$

2.18 lentelė. Regresinės analizės koeficientų analizė.

	<i>Koeficientas</i>	<i>Standartinė nuokrypa</i>	<i>t Stat</i>	<i>Įtaka</i>	<i>Apatinė riba 95%</i>	<i>Viršutinė riba 95%</i>
Intercept	1736,44	182,52	9,51	$9,58 \cdot 10^{-8}$	1347,43	2125,46
Kintamasis X1 (n)	-0,184	0,040	-4,59	$3,47 \cdot 10^{-4}$	-0,270	-0,09
Kintamasis X2 (F _y)	19,33	4,01	4,82	$2,27 \cdot 10^{-4}$	10,78	27,89

Atlikus statistinę analizę matome, jog ašinė pastūma turi didesnę įtaką jėgai, nei sukimosi greitis n. Tai galime apskaičiuoti 2 formule.

$$F_s = 1736,44 - 0,184 \cdot n - 19,33 \cdot F_y \quad 2$$

kur F_s – suvirinimo jėga; n – įrankio sukimosi greitis; F_y – pastūma

Naudojant 2 formulę apskaičiuavome jėgas ir jas surašėme į 2.19 lentelę palyginimui.

2.19 lentelė. Eksperimentinių ir apskaičiuotų jėgų palyginimas

Nr	Medžiaga	Įrankio tipas	Apsisukimai (aps/min)	Pastūma (mm/min)	Ašinė jėga F (N)	Apskaičiuot a ašinė jėga (N)
1	AlMg3W19	Trikampis	3000	10	1191	1377
2			3000	20	1511	1571
3			3000	30	1791	1764
4			4000	10	1156	1193
5			4000	20	1375	1387
6			4000	30	1644	1580
7			5000	10	1119	1009
8			5000	20	811	1103
9			5000	30	1461	1396
10	TL091-T4	Keturkampis	3000	10	1383	1377
11			3000	20	1681	1571
12			3000	30	1808	1764
13			4000	10	1218	1193
14			4000	20	1454	1387
15			4000	30	1559	1580
16			5000	10	1142	1009
17			5000	20	1350	1203
18			5000	30	1266	1396

Atlikus analizę abiem aliuminio lydiniams galime teigti, jog 2 formulė yra gera, nes didžiausias skirtumas tarp eksperimentinės ašinės jėgos ir apskaičiuotos jėgos neviršija 20%. Tai pavaizduota 2.16 lentelėje, kai virinamas AlMg3W19 lydinys su trikampe ašele, apsisukimai yra 5000 aps/min, o pastūma 20 mm/min.

IŠVADOS

Atlikus taškinio frikcinio suvirinimo proceso literatūros apžvalgą, eksperimentinius bandymus, bei ANOVA statistinio tyrimo analizę, suformuotos tokios išvados:

Atlikta literatūros apžvalgos analizė apie taškinį frikcinį suvirinimą (FSSW). Šis suvirinimo būdas daugiausiai yra taikomas suvirinti aliuminio lydinius. Apžvelgus anksčiau atliktų bandymų rezultatus, nustatytas, jog mažiausiai ištirtos medžiagos yra AlMg3W19, bei TL091-T4, todėl bandymų objektu buvo pasirinktos šios medžiagos. Taip pat buvo nustatyta, jog pagrindiniai virinimo parametrai yra – įrankio sukimosi greitis n (aps/min), suvirinimo pastūma F_a (mm/min), įrankio tipas, bei medžiaga. Daugiausia bandymų buvo atlikta su apskritimo formos įrankiu, todėl buvo nuspręsta bandymus atlikti su trikampio ir keturkampio tipo įrankiais.

Atlikti eksperimentiniai bandymai su dvejomis skirtingomis aliuminio plokštelėmis – (AlMg3W19, TL091-T4). Gauti rezultatai pavaizduoti ašinių jėgų, bei momentų priklausomybių nuo laiko grafikuose.

Išanalizavus rezultatus gauname, jog mažiausia ašinė jėga F_a , bei mažiausias momentas yra tada, kai turime didžiausius apsisukimus $n = 5000$ aps/min, bei mažiausią pastumą $F_y = 10$ mm/min. Taip pat nustatėme, jog ašinės jėgos F ir momentai M yra mažiausi kai naudojame trikampio formos ašelę.

Atlikti mikrostruktūrų bandymai abejoms medžiagoms (AlMg3W19, TL091-T4) esant vienodiems suvirinimo režimams. Nustatyta, kad TL091-T4 aliuminio lydinio terminio poveikio HAZ (Heat Affected Zone) zona yra didesnė, nei AlMg3W19 aliuminio lydinio, nes TL091-T4 aliuminio lydinio terminis laidumas yra didesnis, nei AlMg3W19 aliuminio lydinio. TL091-T4 aliuminio lydinio terminis laidumas yra 190 W/m-k, o AlMg3W19 aliuminio lydinio terminis laidumas yra 130 W/m-k.

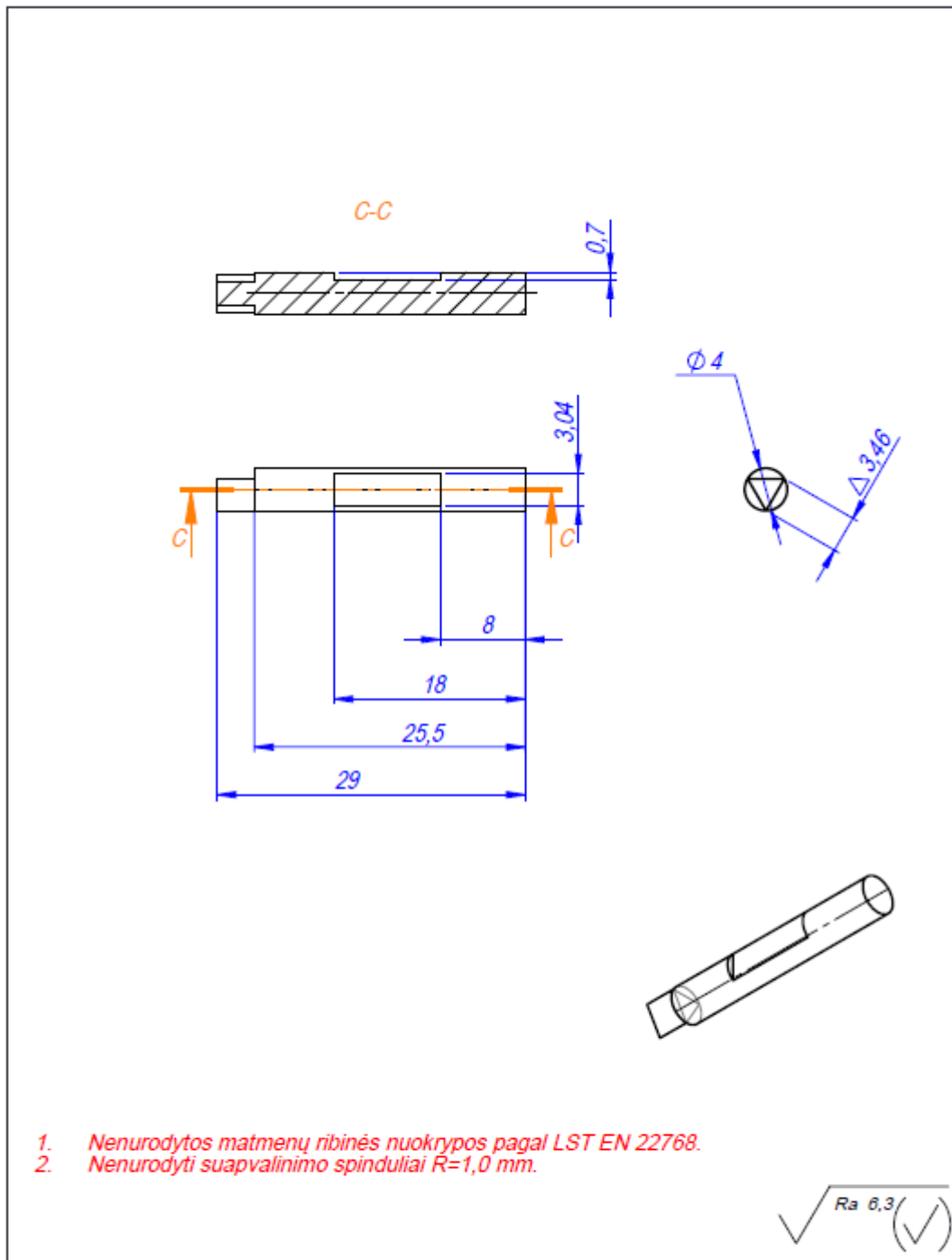
Atlikta statistinė sklaidos analizė ANOVA abiem aliuminio bandiniams. Ši analizė parodė, kad didžiausią įtaką virinimui turi ašinė pastūmą F_y . Gauta lygtis AlMg3W19 aliuminio lydiniui yra $F_s = 2926,72 - 0,293 \cdot n - 1,8 \cdot F_y$, o TL091-T4 – aliuminio lydiniui yra $F_s = 1736,44 - 0,184 \cdot n - 19,33 \cdot F_y$.

LITERATŪRA

1. Metalų virinimas iš „*BESTEEL*” [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-23]. Prieiga per internetą: <http://www.besteel.lt/metalu-suvirinimas/>
2. Mašinų elementai ir skaičiavimai iš *KTU eBooks* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-24]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/188/masinu-elementai-skaiciavimai-ir-konstravimas/>
3. Frikcinis taškinis virinimas iš *Hindi* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-24]. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/697170/>
4. Frikcinis taškinis virinimas paveiklėlis iš *Hindi* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-24]. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/697170/fig1/>
5. Frikcinis taškinis virinimas iš *Assemblyman* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-25]. Prieiga per internetą: <http://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding>
6. Frikcinis taškinis virinimo įrankiai iš *TwI-global* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-26]. Prieiga per internetą: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrialisation-of-friction-stir-welding-for-aerospace-structures-december-2001/>
7. Frikcinis taškinio virinimo ašelių formos iš *Thieves* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-26]. Prieiga per internetą: <http://www.theijes.com/papers/v5-i6/version-2/F050602029036.pdf>
8. Frikcinis taškinio virinimo robotai iš *Frictionstirlink* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-27]. Prieiga per internetą: <http://www.frictionstirlink.net/friction>
9. Frikcinis taškinis virinimas aliuminio lydiniams iš *Researchgate* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-05-28]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/281449824_Friction_stir_spot_welding_of_aluminum_alloys_A_recent_review
10. **N. Pathak, K. Bandyopadhyay, M. Sarangi, S. K. Panda.** Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum – 5754 Sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 131-144 – Volume 22(1) 2013.
11. **S.Babu, V. S. Sankar, G. D., Janaki Ram, P. V. Venkitakrisjnan Reddy, K. Prasad Rao.** Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aliuminum AA2014. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 71-84 – Volume 22(1) 2013.
12. **S. H. Chowdhury, D.L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao, P. Wanjara.** Lap shear strenght and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A* 556. p.500 – 509. 2012.

13. **Zhikang Shen, Xinqi Yang, Zhaohua Zhang, Lei Cui, Tielong Li.** Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. *Materials and Design* 44. p. 476 – 486. 2013.
14. **Huijie Liu, Yunqiang Zhao, Xiangye Su, Lilong Yu, Juncai Hou.** Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded 2A12-T4 Aluminum Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013.
15. **R. Karthikeyan, V. Balasubramanian.** Predictions of the optimizes friction stir spot welding process parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM. Springer. *Int J Adv Manuf Technol*. p.173-183. 2010.
16. **Mokhtar Awang, Victor H. Mucino.** Energy Generation during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Al 6061-T6 Plates. *Materials and Manufacturing Processes*. p. 167-174. 2010.
17. **Zhaohua Zhang, Xinqi Yang, Jialong Zhang, Guang Zhou, Xiaodong Xu, Binlian Zou.** Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials and Design*. p. 4461-4470. 2011
18. Šlifavimo – poliravimo įrenginys [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-12-19]. Prieiga per internetą: <http://www.polishing-technology.com/en/product/polishing-machine-smartlamr-20>
19. AlMg3W19 aliuminio lydinio cheminė sudėtis [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-12-06]. Prieiga per internetą: http://www.cnc.at/media/pdf/material/Datenblatt_AlMg3_EN_AW-5754.pdf
20. TL091-T4 aliuminio lydinio cheminė sudėtis [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-12-06]. Prieiga per internetą: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/5754-AlMg3-3.3535-A95754-Aluminum>
21. TL091-T4 aliuminio lydinio mechaninės savybės [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-12-19]. Prieiga per internetą: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6016-T4-Aluminum>
22. AlMg3W19 aliuminio lydinio mechaninės savybės [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017-12-19]. Prieiga per internetą: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/5754-AlMg3-3.3535-A95754-Aluminum>
23. **Henrikas Medekšas.** Gaminių kokybė ir patikimumas. p. 203-205. 2003.

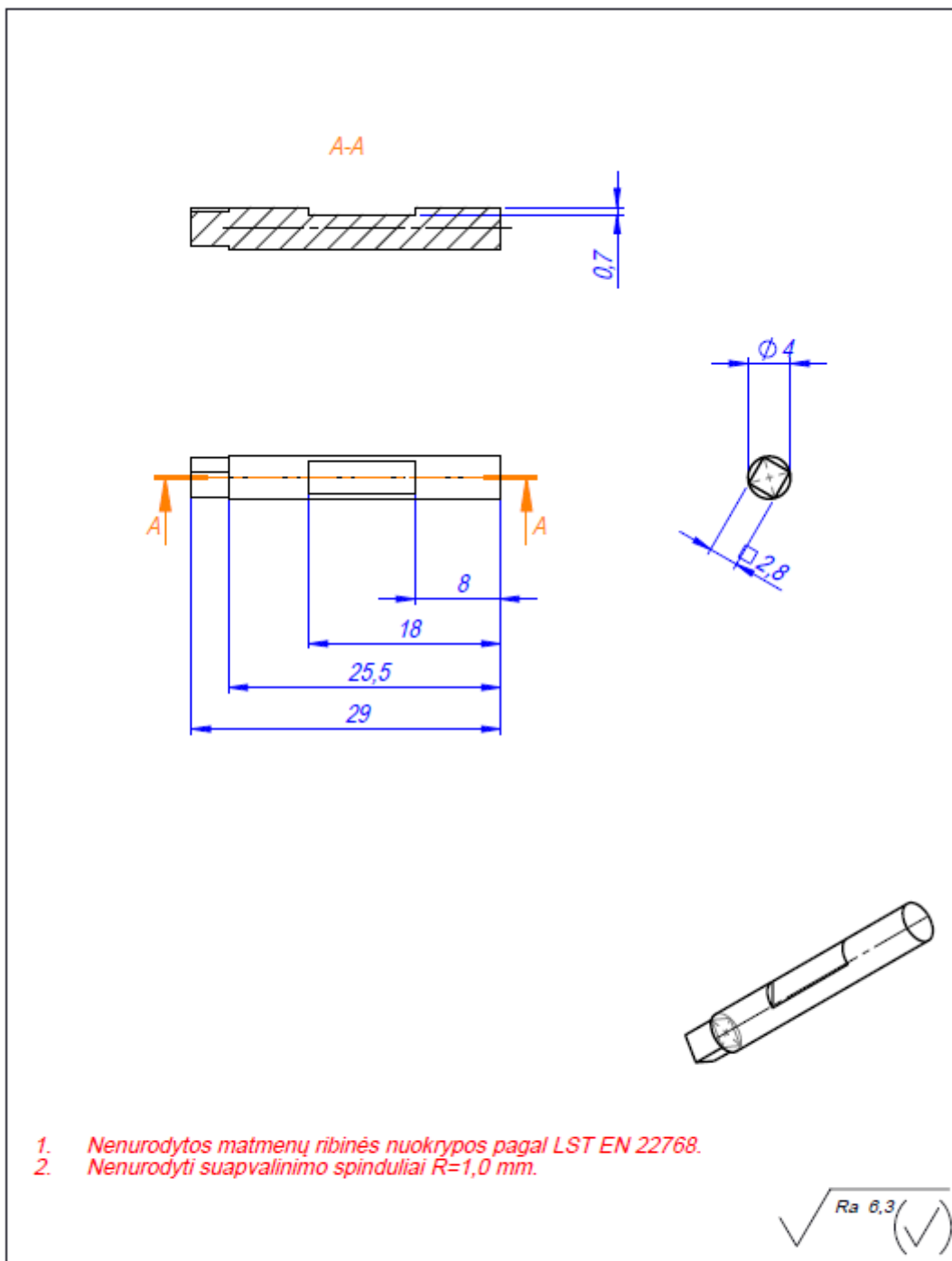
PRIEDAS 1



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Greitapjūvis plienas HSS</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba <i>MIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Taškinio frikcinio virinimo įrankio dalis</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>Julius Juška</i>	Antraštė <i>Trikampė ašelė</i>	<i>000.00.01</i>	
	Tvirtino <i>Ramūnas Česnavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>2018-01-04</i>
			Kalba <i>lt.</i>	Lapas <i>1/1</i>

PRIEDAS 2



1. Nenurodytos matmenų ribinės nuokrypos pagal LST EN 22768.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai $R=1,0$ mm.

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga <i>Greitapjūvis plienas HSS</i>	Mastelis <i>2:1</i>
Atsakinga žinyba <i>MIK</i>	Konsultantas	Dokumento tipas <i>Taškinio frikcinio virinimo įrankio dalis</i>	Dokumento statusas <i>Mokomasis</i>	
Savininkas <i>KTU</i>	Rengė <i>Julius Juška</i>	Antraštė <i>Keturkampė ašelė</i>	<i>000.00.02</i>	
	Tvirtino <i>Ramūnas Česnavičius</i>		Laida <i>A</i>	Data <i>2018-01-04</i>
			Kalba <i>lt</i>	Lapas <i>1/1</i>