



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Harius Olišauskas

Frikinio suvirinimo ištisine siūle proceso tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

dr. Ramūnas Česnavičius

Kaunas, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Frikinio suvirinimo ištisine siūle proceso tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Mechanikos inžinerija 621H30001

Vadovas

dr. Ramūnas Česnavičius

Recenzentas

doc. Lina Kavaliauskienė

Projektą atliko

Harius Olišauskas

KAUNAS, 2016

**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 Hariui Olišauskiui

1. Darbo tema: *Frikinio suvirinimo ištisinė siūle proceso tyrimas; Investigation of friction stir welding process*

2. Darbo tikslas: *Atlikti frikinio suvirinimo tyrimą. Ištirti atsirandančias jėgas, nustatyti suvirinimo siūlės kokybę. Sudaryti kompiuterinį frikinio virinimo proceso modelį ir palyginti rezultatus su eksperimentiniais duomenimis*

3. Darbo uždaviniai

- atlikti literatūros apžvalgą, susijusią su frikinio virinimo tema;
- atlikti frikinio virinimo bandymus skirtingais režimais ;
- atlikti siūlės stiprumo analize ;
- sudaryti kompiuterinį frikinio virinimo proceso modelį;
- palyginti modeliavimo ir eksperimentinius rezultatus;
- nustatyti geriausias virinimo režimus ;

4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas

iki

(data)

Užduotį gavau:

(studento vardas, pavardė, parašas)

(data)

Vadovas:

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

Turinys

Įvadas.....	9
1 Literatūros apžvalga	10
1.1 Suvirtieji sujungimai budai	10
1.2 Frikcinis suvirinimas (FSW).....	12
1.3 Frikcinio suvirinimo principas	13
1.4 Proceso parametrai	14
1.4.1 Frikcinio suvirinimo įrankis	14
1.5 Frikcinio suvirinimo mašinos	18
1.6 Frikcinio suvirinimo siūlių tipai	20
1.7 Aliuminio virinimas	21
1.8 Frikcinio virinimo proceso parametrų tyrimai	21
1.9 Literatūros apžvalgos išvados	22
2 Eksperimentinė dalis	24
2.1 Įvadas	24
2.2 Eksperimentinė įranga	25
2.3 Eksperimento metodika	28
2.4 Medžiagų charakteristikos	30
2.5 Medžiagų mechaninių charakteristikų nustatymas	31
2.6 Eksperimento rezultatai	36
2.6.1 Aliuminio lydinio Al 10-50 bandymo rezultatai	37
2.6.2 Aliuminio lydinio TL91T4(AlMg5Mn) bandymo rezultatai	40
2.7 Eksperimentinė garso emisijos analizė	43
2.8 FSW bandiniu tempimo analizė.....	46
2.9 Eksperimentinės dalies išvados	49
3 Frikcinio suvirinimo modeliavimas	50
3.1 Įvadas	50
3.2 Modeliavimo metodika	51
3.2.1 Skaičiavimo modelis ir formulės.....	51
3.3 Skaičiavimo modelis.....	52
3.4 Modeliavimo rezultatai ir jų analizė	56
3.5 Frikcinio virinimo modeliavimo išvados.....	59

4	Išvados.....	60
5	Literatūra.....	61
	Priedas 1	64
	Priedas 2	65
	Priedas 3	66
	Priedas 4	67
	Priedas 5	68



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Frikcinio suvirinimo ištisine siūle proceso tyrimas

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Hariaus Olišausko baigiamasis projektas tema „Frikcinio suvirinimo ištisine siūle 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)

Olišauskas H. „Frikcinio suvirinimo ištisine siūle proceso tyrimas“. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ramūnas Česnavičius ; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas fakultetas , Mechanikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2016 . 68 psl.

SANTRAUKA

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas, atlikti frikcinio virinimo bandymus, virinant ištisinę siūlą. Projektą sudaro šie etapai : 1- literatūros analizė ; 2 – eksperimentinė dalis; 3 – frikcinio virinimo modeliavimas ; 4 – išvados.

Pirminiame skyriuje apžvelgiama frikcinio virinimo technologija ir virinimo principas. Buvo analizuotas frikcinio virinimo įrankis, jo geometrija ir virinimo siūlės kokybė nuo įrankio formos.

Eksperimentinėje dalyje buvo pasirinktos virinamos medžiagos. Atlikti frikcinio virinimo bandymai. Keičiant įrankio sukimosi greitį n ir skersinę pastumą F_y . Gautos jėgos kitimo kreivės laike. Atlikti frikcinio virinimo siūlės stiprumo nustatymas naudojantis statinio tempimo būdu.

Modeliavimo dalyje naudojantis SolidWorks 2016 sukurtas virinimo 3D modelis. Naudojantis Abaqus/Expliciti modeliavimo paketu, sukurtas skaičiuojamasis modelis. Gautos jėgos kitimo kreivės laike, kurios buvo palygintos su gautomis jėgomis eksperimento metu. Gauti Von Misses įtempių kitimo laike kreivės.

Reikšminiai žodžiai: *virinimas, frikcinis virinimas*

Olišauskas, H. “Investigation of friction stir welding process “Master final project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Ramūnas Česnavičius; Kaunas University of Technology, Mechanikos inžinerijos ir dizaino faculty, Mechanikos inžinerijos department.

Kaunas, 2016. 68 p.

SUMMARY

The aim of this work is to design investigation of friction stir welding process. The steps of the design process are the following: 1) Theoretical background, 2) experimental part, 3) friction stir welding modelling, 4) Conclusions.

The first part “Theoretical background” of friction of stir welding. Technology and welding principle. It has been analysed friction welding tool, its geometry and quality of the welding from tools.

The experimental part was selected a welding materials. Perform the friction welding test. When changing the rotational speed n and transverse feed rate F_y . The resulting force variation curves over time. Perform the friction welding seam volume in the building by drawing

Modelling in using SolidWorks 2016 is designed for welding the 3D model. Using Abaqus / Explicit modelling package, developed computational model. The resulting force variation curves over time. Which was compared with that obtained from the forces during the experiment. Get the Von Misses stress in time.

Keywords: Welding, Friction stir welding.

Įvadas

Temos aktualumas. Šiuolaikinėje metalo gaminių pramonės srityje yra didelė konkurencija. Šiuo metu įvairiose inžinerijos srityse pasiektas gana aukštas inžinerijos suvokimas. Viena iš šių sričių yra metalo gaminių virinimas. Be seniai naudojamų tradicinių suvirinimo būdų: elektros lankų, plazminio dujų srauto, taškinio suvirinimo ir daugelio kitų suvirinimų, vis plačiau naudojami nauji, progresyvūs virinimo būdai: lazerinis suvirinimas, frikcinis suvirinimas. Naudojantis tokiais būdais virinimas gali būti atliekamas tiksliau, našiau, gali būti virinamos medžiagos, kurias tradiciniais būdais suvirinti neįmanoma arba labai sunku.

Svarbiausias suvirinimo rodiklis – siūlės patikimumas. Siūlė turi atitikti eksploatacinius konstrukcinius reikalavimus. Jai įtakos turi metalo sudėtis, suvirinimo būdas ir režimas. Virinant įprastinėmis technologijomis geras suvirinamumas laikomas tuomet, kai gautos siūlės sujungimo stiprumas lygus pagrindinio metalo stiprumui, joje nėra plyšių.

Vienas iš galimų suvirinimo būdų yra frikcinis virinimas FSW (Friction Stir Welding) . Frikcinis virinimas tinka virinti medžiagoms (aliuminis, aliuminio lydiniai, varis), kurias kitais būdais suvirinti yra sudėtinga. Šis virinimo būdas pradėtas taikyti visai neseniai, tik XX a. pabaigoje, todėl jis dar plačiai nėra taikomas. Suradus šio virinimo optimaliausius režimus, galima stipriai paspartinti pramonės augimą. Įmonės naudojančios šią virinimo technologiją, taptų daug pranašesnės už konkurentes. Frikcinis suvirinimas yra vienas iš perspektyviausių suvirinimo būdų.

Darbo tikslas – atlikti frikcinio suvirinimo tyrimą. Ištirti atsirandančias jėgas, nustatyti suvirinimo siūlės kokybę. Sudaryti kompiuterinį frikcinio virinimo proceso modelį ir palyginti rezultatus su eksperimentiniais duomenimis. Suprojektuoti eksperimentinį bandymu prietaisą ir atlikti suvirinimo analizę.

Darbo uždaviniai:

- atlikti literatūros apžvalgą, susijusią su frikcinio virinimo tema;
- atlikti frikcinio virinimo bandymus skirtingais režimais ;
- atlikti siūlės stiprumo analizę ;
- sudaryti kompiuterinį frikcinio virinimo proceso modelį;
- palyginti modeliavimo ir eksperimentinius rezultatus;
- nustatyti geriausius virinimo režimus ;
- atlikti rezultatų analizę ir padaryti išvadas;

1 Literatūros apžvalga

1.1 Suvirtieji sujungimai budai

Suvirinimas yra technologinis procesas neišardomam sujungimui gauti. Šiuo metu jis plačiai paplitęs visame pasaulyje, nes suvirintos konstrukcijos yra patvarios, medžiagas galima suderinti pagal jų paskirtį, detales šioms konstrukcijoms – gaminti pažangiausias būdais. Suvirintos konstrukcijos yra lengvesnės už lietas, kaltas ar kniedytas.[1]

Suvirintosios jungtys – tai neišardomosios jungtys, gaunamos panaudojant molekulių sukibimo jėgas, sujungimo vietoje medžiagą išlydant arba įkaitinant iki plastinės būklės ir mechaniškai suspaudžiant.

Suvirintąsias jungtis galima klasifikuoti pagal kelis požymius (paskirtį, gamybos technologiją ir t.t), bet dažniausiai jos klasifikuojamas pagal suvirinamų elementų tarpusavio išsidėstymą:

- sandūrinės;
- užlietinės;
- tėjinės;
- kampinės.

Dažniausiai suvirintosios jungtys klasifikuojamos pagal siūlės tipą – skiriamos sandūrinėmis ar kampinėmis siūlėmis suvirintos jungtys. Sandūrinėmis siūlėmis dažniausiai suvirinamos sandūrinės tėjinės ir kampinės jungtys, kampinėmis – užlietinės, tėjinės ir kampinės jungtys.

Suvirintieji sujungimai yra racionaliausi ir labiausiai paplitę neišardomi sujungimai. Plačiausiai naudojami šie suvirinimo būdai:

- lankinis suvirinimas;
- lankinis suvirinimas po fluso sluoksniu;
- suvirinimas apsauginėje dujų aplinkoje;
- elektrinis – šlakinis suvirinimas;
- dujinis suvirinimas;
- suvirinimas spinduliais (elektroniniais, lazerio ar šviesos);
- varžtinis suvirinimas;
- kontaktinis suvirinimas;

Suvirintųjų jungčių *privalumai*:

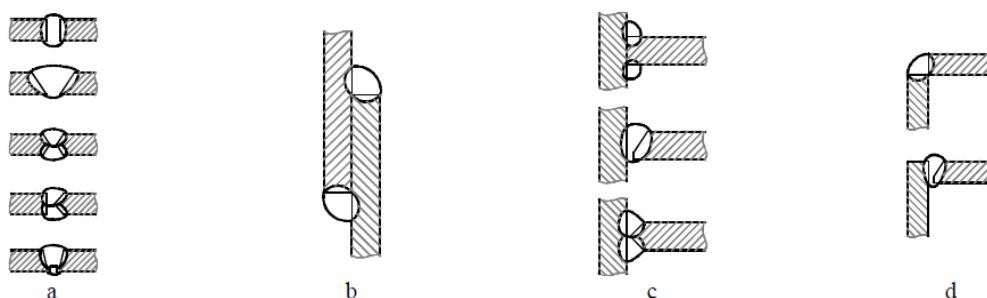
1. Galimybė gauti didelių gabaritų detales (laivų ir lėktuvų korpusai, vamzdynai, rezervuarai, ferminės konstrukcijos, tiltai ir pan.). Tokių detalių pagaminimo kaina vienetinėje ir mažų serijų gamyboje yra mažesnė lyginant su kitais gamybos būdais, pvz.: liejimu.
2. Detalių masės sumažėjimas iki 50%, lyginant su lietomis detalėmis, ir iki 20 %, lyginant su kniedytomis detalėmis. Tai pasiekama sumažinus sienelių storius, užlaidas apdirbimui, susilpninančių skylių ir antdėklų nebuvimu.
3. Galimybė automatizuoti suvirinimo procesą.

Suvirintųjų jungčių *trūkumai*:

1. Suvirinant lydymu praktiškai neišvengiamai siūlių defektai (nevisiškas suvirinimas, šlakų intarpai, dujų pūslelės), kurie sumažina jungties stiprumą.
2. Gaunami liekamieji įtempimai (dėl temperatūrinių deformacijų, kurios atsiranda dėl nevienodo kaitinimo), kurie sumažina jungties stiprumą. Todėl atsakingose konstrukcijose suvirintas jungtis būtina papildomai mechaniškai apdirbti.
3. Dėl vietinio kaitinimo terminio poveikio zonoje netoli siūlės pasikeičia pagrindinio metalo mechaninės charakteristikos.

Paminėti trūkumai lemia įtempimų koncentraciją, kuri žymiai sumažina jungties stiprumą esant ciklinėms apkrovoms.

Pagal konstrukciją suvirintosios jungtys skirstomos į (1.1 pav.): sandūrinės, užlietinės, tėjinės ir kampinės.

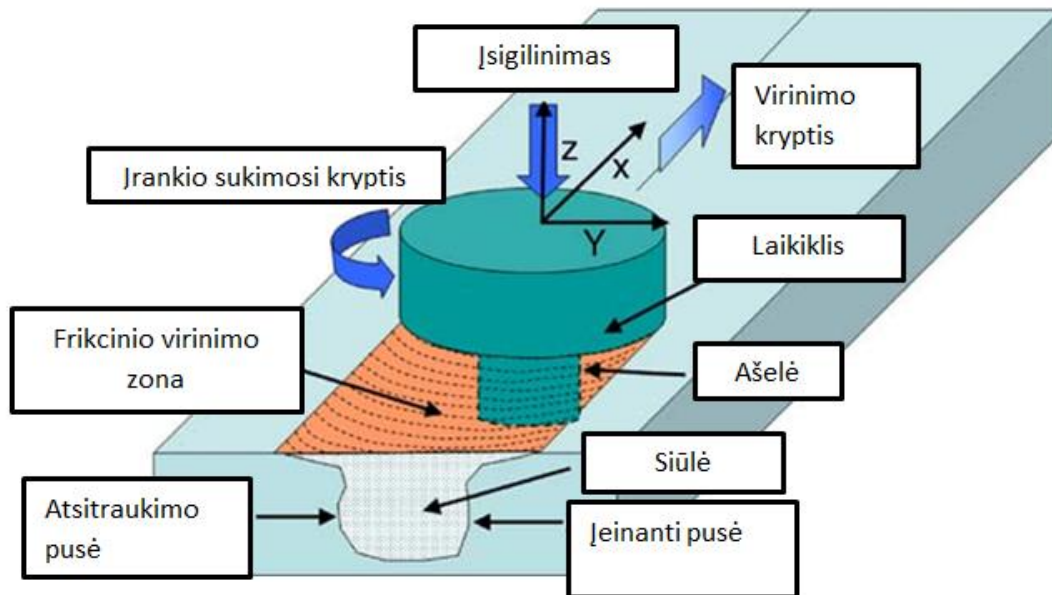


1.1 pav. Suvirintųjų jungčių klasifikacija pagal suvirinamų elementų tarpusavio išdėstymą: a – sandūrinės; b – užlietinė ; c – tėjinės; d – kampinės[2]

1.2 Frikcinis suvirinimas (FSW)

Šiuolaikinė pramonė neįsivaizduojama be suvirinimo. Tai vienas labiausiai naudojamų detalių sujungimo būdų. Vienas iš naujausių suvirinimo būdų yra „Frikcinis suvirinimas (FSW)“, kuris anksčiau nebuvo paminėtas. Lietuvoje šis suvirinimas labiau žinomas teoriškai, nei praktiškai naudojamas.

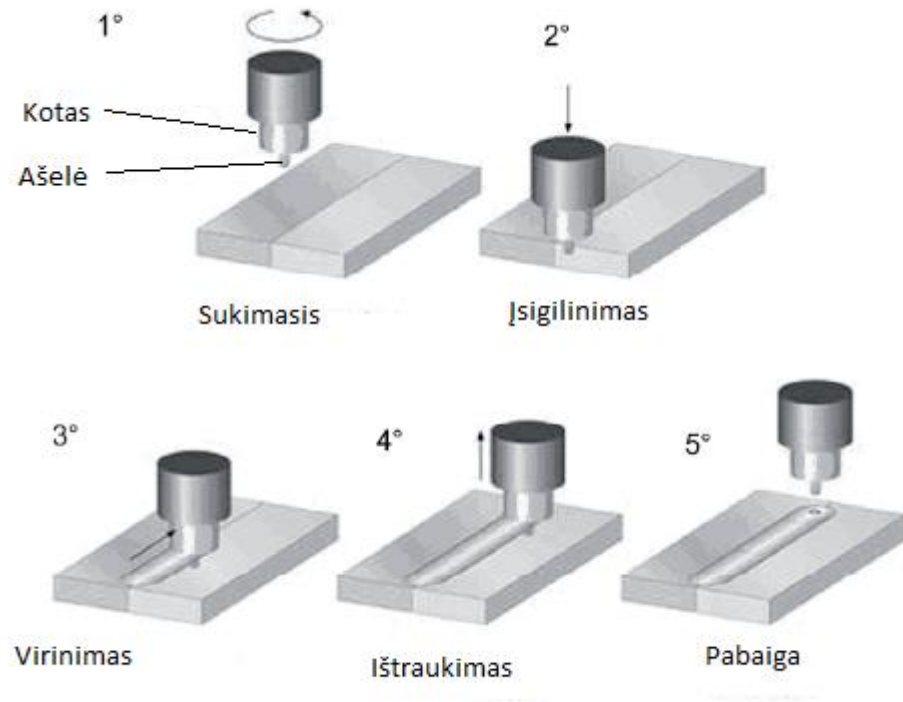
Frikcinis virinimas (FSW) buvo išrastas suvirinimo institute Kembridže, Jungtinėje karalystėje 1991 metais. Tai yra termomechaninis kietos būsenos sujungimo procesas, jungiantis karštą presavimą ir kalimą. Pagrindinis principo procesas yra pavaizduotas (1.2 pav.). Procesas veikia generuojant trinties šilumą tarp besisukančio įrankio ir medžiagos (įrankis yra kietesnis nei medžiaga). Jo metu yra sukamas cilindro formos briaunuotas įrankis su ašele ir lėtai panardinamas į metalą. Apdorojant storas detales, būtina išgręžti pagalbinę skylę tam, kad panardinimo metu nenusidėvėtų ašelė. Tarp atsparaus dilimo įrankio briaunelės ir metalo susidaro trintis, dėl kurios metalas suminkštėja, nepasiekdamas lydymosi temperatūros, todėl įrankis gali judėti skersai ir išilgai sujungimo linijos (1.2 pav.) [3].



1.2 pav. Frikcinio suvirinimo (FSW) proceso schema [3]

1.3 Frikcinio suvirinimo principas

Labiausiai FSW procesas gali būti paaiškinamas, visą procesą išskaidant į 5 dalis (1.3 pav.) t.y. sukimasis, įsigilinimas, virinimas, ištraukimas, pabaiga. Procesas pradedamas nustatant tinkamiausius parametrus. Įrankiui sukantis nustatyto greičiu, jis įgilinamas iki nustatyto gylio. Įsigilinimas neturi viršyti plokštelės storio .



1.3 pav. Frikcinio virinimo suvirinimo procesai [6]

Frikciniam suvirinimui (FSW) yra svarbūs du parametrai: įrankio sukimosi greitis (v , aps/min), kuris gali būti pagal laikrodžio rodyklę ar prieš laikrodžio rodyklės kryptį ir pastuma (n , mm/min), t. y., judėjimas pagal sujungimo siūlę. Sukantis įrankiui atsiranda maišymosi procesas ir medžiagos tekėjimas aplink ašelę, įrankis perkelia išmaišytą medžiagą iš priekio į galą kaiščio atžvilgiu tokiu būdu baigiamas suvirinimo procesas. Aukštesnis įrankio sukimasis sukuria didesnę temperatūrą dėl aukštesnės trinties ir intensyvesnį maišymą. Padidėjus sukimosi greičiui, padidėja trinties koeficientas darbinėje zonoje.

Be įrankio sukimosi greičio ir pastumos –, dar vienas svarbus parametras yra pokrypio kampas arba įrankio pokrypis dėl ruošinio paviršiaus. Tinkamas pokrypio kampas garantuoja, kad įrankio kaištis gerai išmaišys medžiagą ir efektyviai perkels iš priekio į kaiščio nugarą.

Kaiščio įterpimo gylis –, kai įterpimo gylis yra per sekus, įrankio kotas nesusiliečia su ruošinio paviršiumi. Tokiu būdu, peties sukimas negali efektyviai išmaišyti medžiagos, perkelti jos iš priekio į galą, tokiu būdu gaunamas suvirinimas su grioveliu. Kai įterpimo gylis yra per gilus, kotas panyra į ruošinį. Šiuo atveju gaunamas įgaubtas suvirinimas.

Išankstinis įrankio kaitinimas ir aušinimas gali taip pat būti svarbus kai kuriems specifiniams FSW procesams. Medžiagoms, kurioms būdinga aukšta lydymosi temperatūra, pvz.: plienui, titanui arba aukšto laidumo medžiagoms, tokioms kaip varis, gali būti nepakankama trintis ir temperatūra, kad medžiaga suminkštėtų ir prasidėtų medžiagos tekėjimas aplink sukimosi įrankį. Todėl sudėtinga pagaminti vientisą suvirinimą be defektų. Gaunama, kad pirminio pašildymo arba papildomo išorinio šildymo galimas pagerėjęs medžiagos tekėjimas ir pagerintas suvirinimo procesas. Kitoms medžiagoms, kurioms būdinga žemesnė lydymosi temperatūra, tokioms kaip aliuminis ar magnis, aušinimas gali būti panaudotas kristalizacijai sumažinti ir sustiprinti išformavimą aplink išmaišytą zoną.

1.4 Proceso parametrai

Frikiniam suvirinimui (FSW) yra būdingas sudėtingas plastinių deformacijų ir medžiagos tekėjimo vyksmas. Suvirinimo parametrai, įrankio geometrija ir sujungimo tipas daro didelę įtaką medžiagos savybių modeliui ir temperatūros pasiskirstymui, o tai paveikia medžiagos mikrostruktūrą. Šioje dalyje paanalizuosime parametrus, lemiančius frikinį suvirinimą.

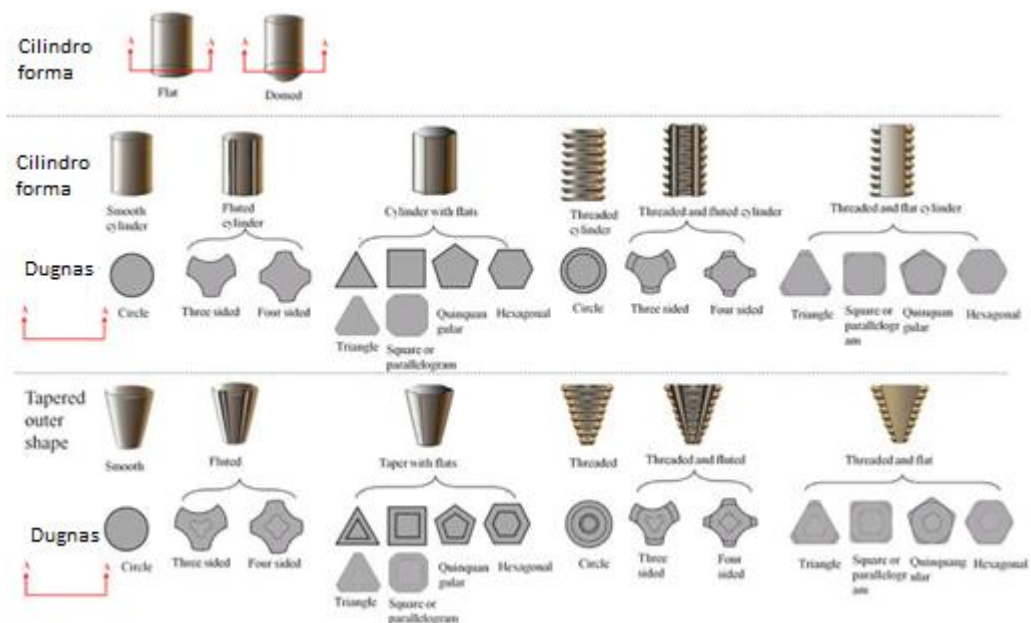
1.4.1 Frikinio suvirinimo įrankis

Norint gauti stiprią suvirinimo siūlę, reikia parinkti tinkamiausią įrankio geometriją. Įrankio geometrija yra vienas svarbiausių suvirinimo proceso aspektų. Įrankio geometrija atlieka svarbų vaidmenį medžiagų tekėjime ir, savo ruožtu, valdo perėjimo normą, pagal kurią vyksta frikinis suvirinimas (FSW). Įrankis susideda iš koto (shuolder) ir ašelės (pin), įrankio sudedamosios dalys pavaizduotos (1.4 pav.)



1.4 pav. Įrankio sudedamosios dalys [3]

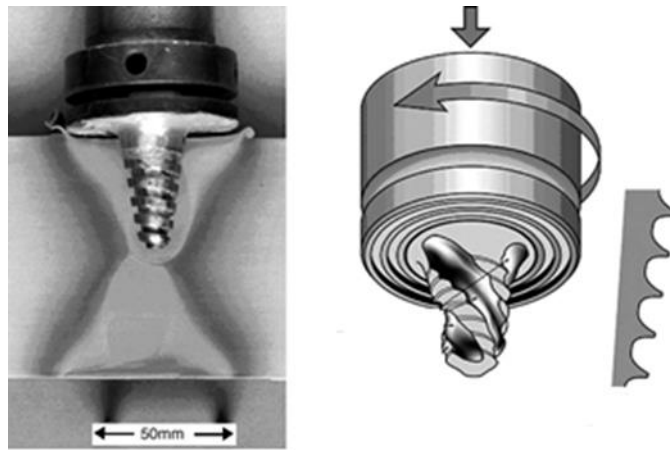
Vienas iš pagrindinių geometrinių įrankių yra ašėlės forma (1.5 pav.). Ašėlės forma turi sukurti pakankamai šilumos ir pakankamai paskirstyti metalą. Galimi keli ašelių variantai, pagrindinės formos turinčios įtakos suvirinimo stiprumui yra skerspjūvio forma (cilindras, trikampis, daugiakampis) ir paviršiaus forma (lygus, sriegtas, kūginis, sriegtas kūginis).



1.5 pav. Ašėlės formos [5]

Kaip jau minėta anksčiau, įrankis turi dvi pagrindines funkcines dalis: (a) lokaliajam šildymui ir (b) medžiaga tekėjimui. Pradiniam įrankio įsiskverbimui, medžiagos kaitinimui didžiausią įtaką turi tarpas tarp kaiščio ir darbinės plokštumos. Kai medžiaga užkaitinama, atsiranda medžiagos deformacijos. Ir įrankis leidžiasi žemys tol, kol kotas paliečia darbinį paviršių. Atsižvelgiant į kaitinimą, santykinis dydis tarp kaiščio ir koto yra svarbus, palyginus su kitomis konstrukcinėmis dalimis. Kotas taip pat apriboja medžiagos šildymą. Antroji įrankio funkcija yra „išmaišyti“ ir „judėti“ medžiagą. Mikrostruktūros vienodumą, vienodą savybių pasiskirstymą bei proceso apkrovimą nulemia įrankio dizainas.

Didėjant supratimui apie medžiagos tekėjimą, buvo tobulinama frikcinio suvirinimo įrankio geometrija. Ji smarkiai pasikeitė nuo pradinės formos. Sudėtingos funkcijos buvo keičiamos į paprastesnes, maišomos ir gaunamos mažesnės jėgos. Tuomet buvo sukurti įrankiai „Whorl™“ ir „MX Triflute™“ (1.6 pav.)

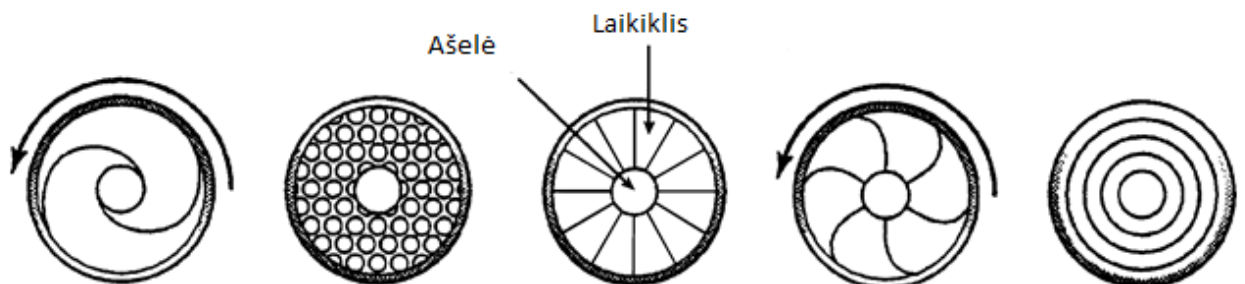


1.6 pav. Worl ir MX Triflute įrankiai „The Welding institute“ (TWI), UK. [3]

Autoriai nurodo, kad kaiščiai suformuoti kaip nupjauta piramidė, kuriai reikia mažiau medžiagos negu cilindriniam to paties skersmens įrankiui. „Whorl“ įrankio apimtis mažesnė maždaug iki 60%, MX Triflute mažina apimtį maždaug iki 70 % apimties. Savo savybėmis WhorlTM ir MX TrifluteTM [3]:

- mažina suvirinimo jėgą;
- įgalina lengvesnę plastinės medžiagos tekėjimą;
- lengvina einantį žemyn įsiskverbimą į medžiagą;
- didina sąsają tarp kaiščio ir medžiagos, tuo būdu didindamas šilumos gamybą.

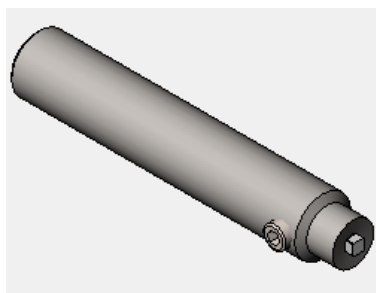
Toliau, įvairūs koto profiliai buvo suprojektuoti TWI, kad tiktų skirtingoms medžiagoms ir sąlygoms (1.7 pav.). Šitie koto profiliai gerina sujungimą tarp įrankio peties ir ruošinių.



1.7 pav. Įrankio kotų geometrija [3]

Atsižvelgiant į didelę įrankio geometrijos įtaką metalo srautui, galima pažymėti, kad įrankio geometrija daro didžiausią įtaką medžiagos pernešimui, maišymui, mikrostruktūros siūlės susidarymui kiekvieno proceso metu. Svarbiausia tinkamai sukurti pagrindinį įrankio dizainą. Tam gali būti pritaikoma baigtinių elementų analizė, su kuria galima sumodeliuoti medžiagos kitimą ir apskaičiuoti ašinės jėgas.

FSW pritaikomas lengvųjų metalų lydiniams: aliuminiui, magniui, variui, virinti. Priklausomai nuo medžiagos, įrankis gali atlaikyti skirtingas šilumines apkrovas. Proceso metu atsirandanti šiluma ir jėgos veikia patį įrankį, įrankiams naudojamos paprastesnės medžiagos, tokiu būdu gaunama mažesnė įrankio kaina.



1.8 pav. Friccinio virinimo įrankis įrankio izometrinis vaizdas

Atlikus friccinio suvirinimo įrankių analizę, buvo parinkta naudoti surenkamą įrankį, kurį sudarys 3 dalys: ašelė, cilindrinė dalis ir tvirtinimo varžtas (1.8 pav.). Šio įrankio privalumas yra tas, kad šiuo įrankiu galima reguliuoti ašelės įsigilinimo gyli. Taip pat tokio įrankio gamyba yra technologiškai paprastesnė.

Norint pasigaminti aukštos kokybės FSW įrankį, medžiagos parinkimas turi didelę reikšmę. Pasak Meilinger ir Torok [9], Zhang ir kiti [10], charakteristikos, kurios turi būti apgalvotos konstruojant FSW įrankį:

- atsparumas susidėvimui;
- kenksmingos reakcijos su suvirinimo metalu įvertinimas;
- stiprumas, stabilumas, atsparumas valkumui padidėjus darbinei temperatūrai;
- turi būti žemas šilumos plėtimosi koeficientas.

Išanalizavus jau atliktus FSW bandymus, (1.1 lentelė), kaip matyti lentelėje, buvo virinami įvairūs aliuminio, vario lydiniai. FSW virintas aliuminis ir kitos mažos lydymosi temperatūros medžiagos. Analizuotuose virinimo procesuose įrankis buvo pagamintas iš plieno. Visuose bandymuose buvo naudotas plienas, tik skirtingo tipo bei charakteristikų, nes šias medžiagas nesunku rasti, jos nesunkiai apdirbamos ir turi geras šilumines savybes.

Šiuose bandymuose buvo naudoti tokios tipo plienai kaip:

- Įrankinis plienas (HCHCR);
- Greitapjūvis plienas (HSS);
- H13;
- C40.

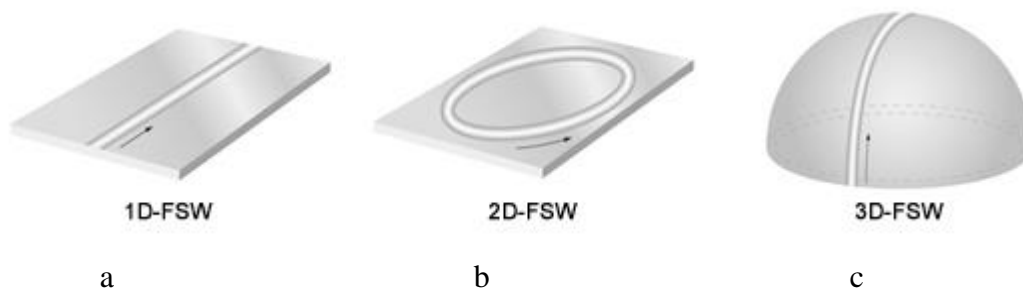
1.1 lentelė Įrankio medžiagos

Eil. Nr.	Virinamos medžiagos	Įrankio medžiaga	Nuoroda
1	AA5080-H111 Al lydinys	HCHCR	[11]
2	AA5754 ir C11000 (varis) 3.175 mm storio	H13	[12]
3	AA2011 ir AA6063 lydinius 10 mm storio	HSS	[13]
4	AA6082 ir AA20244	C40	[14]
5	6061-T6 Al ir AISI 1018 silpnas plienas 6 mm storio	H13	[15]

1.5 Frikcinio suvirinimo mašinos

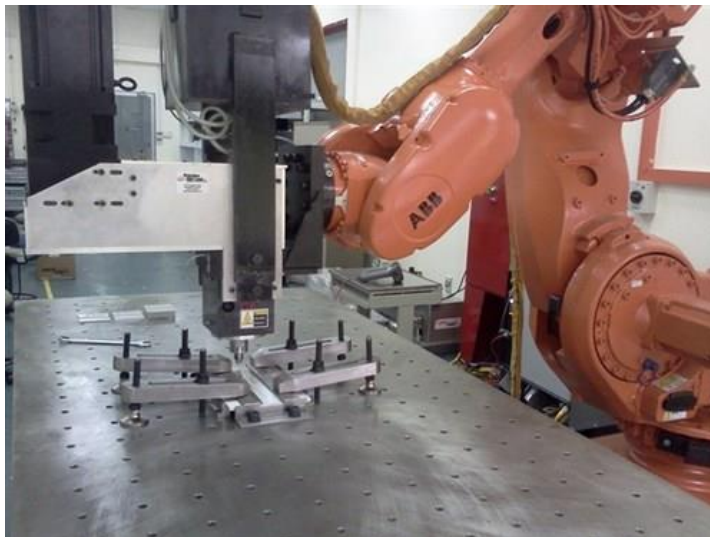
Atsiradus naujam suvirinimo būdai, reikėjo sukurti ir įrangą naudojimui pramonėje. FSW procesas naudojamas automobilių, aviacijos, laivų pramonės srityse. Minėtose pramonės šakose įrenginių surinkimas būna konvejerinis. Todėl buvo mėginta panaudoti pramoninius robotus.

Pramonėje taip pat naudojamos ir staklės. Frikcinis virinimas naudojamas plokštėms ir vamzdžiams sujungti (1.9 pav.), todėl sukurtos stacionarios FSW virinimo staklės.



1.9 pav. Frikcinio virinimo formos: a – plokštės virinimas; b – virinimas 2 D (keliomis ašimis); c – virinimas 3D (šiuo būdu virinami vamzdžiai) [6]

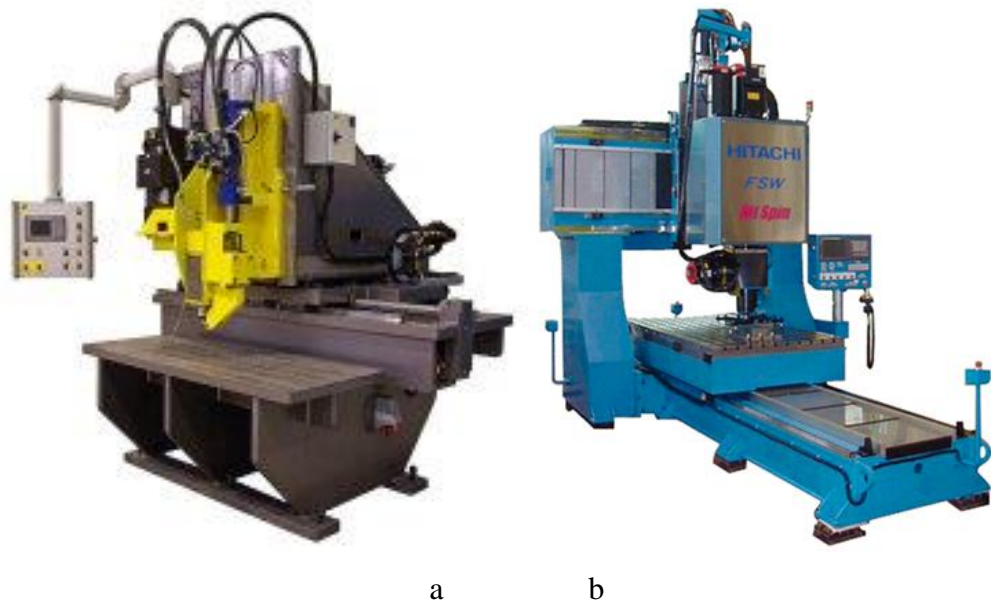
Pritaikius FSW virinimo techniką prie jau esamų pramoninių robotų, buvo sutaupyti resursai ir išnaudojamos esamos galimybės su jau turima technika. FSW virinimo roboto vaizdas yra pateikiamas (1.10 pav.), kaip matyti iš paveikslėlio yra naudojama 360 ° apskirimų galva, kurioje yra naudojamas tik virinimo įrankis.



1.10 pav. FSW virinimo robotas (ABB) [10]

FSW staklių gamintojai gamina vienas staklės, pritaikomas ir FSW, ir FSSW (frikcinis taškinis virinimas) virinimui. Nors virinant šiais būdais atsiranda skirtingos jėgos, FSW ir FSW virinimo procesai yra beveik identiški. Pramonėje paprasčiau ir patogiau išnaudoti vienas staklės keliems virinimo procesams.

Galimi keli staklių variantai – stacionarus stalus (1.11 a pav.), su prijungiamu stalu papildomai dedamas ant staklių (1.11 b pav.). Abejais variantais įrankis gali judėti 3 ašimis. Staklėse su stacionariu stalu atsiranda mažesnės inercinės jėgos, nes juda tik įrankis. Staklėse, su prijungiamu stalu, inercijos jėgos išdidėja, dėl virinimo proceso metu atsirandančių stalą veikiančių inercijos jėgų.

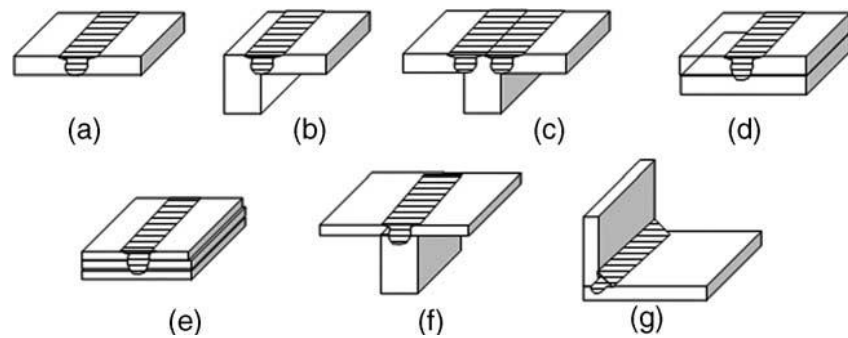


1.11 pav. a – ESAB (Legio) mažo FSW mašina [9]; b – Hitachi virinimo mašina [7]

Išanalizavus FSW staklės, matyti, kad pagrindinis suvirinimo staklių reikalavimas yra suvirinimo staklių arba galvos judėjimas 3 ašimis. Todėl galima panaudoti ir pritaikyti universalius apdirbimo centrus (CNC).

1.6 Frikcinio suvirinimo siūlių tipai

Paprasčiausias suvirinimas yra pavaizduotas (1.12 a pav), kai yra suvirinamos dvi tokio pačio storio plokštelės, kurios yra padėtos ant slenkančio stalo taip, kad jos būtų pritvirtintos standžiai. Nes pradiniu įrankio panirimo momentu yra gana didelės jėgos, taip pat reikia užtikrinti, kad pradiniame momente ruošiniai neišsiskirtų. Įrankis yra panardinamas į junginio liniją, kad judėtų sujungimo linija. Kitas sujungimo būdas dvi plokšteles ar ruošinius sudėti su trečiaja plokštele (1.9 d pav.). Įrankis yra panardinamas per viršutinius ruošinius iki apatinės plokštelės. Toliau seka įrankio judėjimas pagal reikiamą virinimo kelią. Galima virinti kitokiomis virinimo siūlių tipais, nepaminėti tipai pavaziduoti 1.12 e, f ir g pav. Svarbu pažymėti, kad ruošiniui nėra keliami dideli reikalavimai frikciniam suvirinimui. Dvi švarios plokštelės gali būti lengvai suvirinamos.



1.12 pav. Frikcinio suvirinimo siūlių tipai : a – kvadratinis suvirinimas; b – kampo virinimas; c – T formos virinimas; d – asd; e – daugiasluoksnis suvirinimas; f – T formos keletos detaliu suvirinimas; g – kampine siūlė [3]

1.7 Aliuminio virinimas

Frikcinis suvirinimas pritaiko labai svarbus lengvojo metalo lydinius naudojančioms įmonėms. Aliuminis yra viena iš medžiagų galinti pakeisti plieną kai kuriose techniniuose sprendimuose. FSW virinimo tyrimą atlikinėjo tokie mokslininkai kaip J. Adamowski, M. Szkodo (Al 6082-T6), M.W. MAHONEY, C.G. RHODES, J.G. FLINTOFF, R.A. SPURLING ir W.H. BINGEL (7075 T651), C. D. Sorensen and A. L. Stahl (Al 6061-T6).

FSW virinimas daugiausia yra atliekamas su 6,7 klasės aliuminiais. Įrankio apsisukimai kinti : 300 – 2000 aps/min. pastuma nuo 100 – 1000 mm/min.

Atlikus virinimo bandymus buvo analizuojama mikrostruktūra suvirinimo zonoje. Atliekami tempimo bandymai. Kaip pastabėta straipsniuose, FSW siūlės kokybė priklauso nuo procesų parametų (pastumos ir įrankio apsisukimų) ir nuo įrankio konfigūracijos [23].

1.8 Frikcinio virinimo proceso parametų tyrimai

Frikcinio virinimo proceso tyrimų pasaulinių mastu yra atlikta, bet nėra iširtos visos galimos medžiagos. Daugumą tyrimų nagrinėjo vieno iš aliuminio lydinių proceso parametrus.

FSW suvirinimo metų atliekant tyrimą buvo keičiami keli parametrai, kurie daro įtaką suvirinimo kokybei (įtakoja niekad nesakyk ir nerašyk, įtakoja tas pats, kaip kakoja:

- n – įrankio sukimosi greitis;
- F – įrankio apstumą Z ir X ašimis.

Atlikus tolimesnius frikcinio virinimo bandymus (FSW), reikia išanalizuoti jau esamus bandymus. Lentelėje pateikiami duomenys apie virinamas medžiagas, jų storius, pateikiami įrankio apsisukimai, pastumos (1.2 lentelė). Kiekvienas proceso parametro pasikeitimas daro įtaką siūlės mechaninėms charakteristikoms, FSW suvirinimo metu.

1.2 lentelė Atliktu bandymai [1].

Eil. Nr.	Medžiaga	Storis mm	Apsisukimai , aps/min	Pastuma mm/min	Nuoroda
1	7020-T6	4	1400	80	[17]
2	A319	6	1000	120	[18]
3	A413	3	1000	120	[18]
4	707T7351	6	394-457	300-540	[19]
5	Al lydinys	5	600-1500	25-100	[20]
6	6061-T6	5	650	150-200	[21]
7	7070-T6	4	300-1620	100-900	[22]
8	6082-T6	5	230-1700	115-585	[8]
9	AZ31BH24 Mg lydinys	2	1000-2000	300-1800	[23]
10	AZ31 Mg	6	1600	40	[33]

Įrankio sukimosi greičio n pasikeitimai labiausiai daro įtaką išsiskiriančiam šilumos kiekiui Q . Nuo išsiskiriančios šilumos priklauso išsilydžiusio metalo kiekis aplink ašelę. Jeigu išsiskyręs šilumos kiekis bus žemas, medžiagoms, kurių lydimosi temperatūra aušta, suvirinti nepavyks. Dėl įrankio sūkių kinta plokštelių medžiagų maišymasis, prie skirtingų sūkių gaunami skirtingi medžiagų susimaišymai ir dėl to gaunamos skirtingų savybių suvirinimo siūlės.

1.9 Literatūros apžvalgos išvados

Pasauliniu mastu frikcinio virinimo tyrimas yra dar mažai ištyrinėtas. FSW tyrimai finansuojami tokių garsių įmonių kaip ESAB, Hitachi, TWI. Šių įmonių lėšos skiriamos tirti įrankio formoms, režimams, kurie leistų gauti geriausią virinimo siūlę

Daugiausia tyrimų atliekami medžiagos tekėjimo savybėms tirti, frikcinio virinimo metu. Tai pat, dauguma mokslininkų tiria išsiskyrusią šilumą frikcinio virinimo metu. Nustatomos mikrostruktūros kristalų ir grūdelių susidarymą frikcinio virinimo metu.

Frikinio virinimo bandymai buvo atlikinėjami su įvairiais aliuminio lydiniams. Didžioji dalis mokslininkų ieškojo įvairiausių įrankio ašelių formų. Įrankio ašelių forma daro įtaką suvirinimo siūlės formai ir kokybei. Atlikus įrankių tyrimus nustatyta, kad naudingiausia kuomet įrankio laikiklis turi atbulinį kampą. Pagal turimas galias ir turimas lešas pasirinkta ašelių forma kvadratinė, 3x3 kvadratas. Atlikus literatūros apžvalgą matyti, kad didžiausią įtaką suvirinimui turi įrankio sukimosi greitis (n) ir skersinė pastuma (Y ašimi). Keičiant šiuos parametrus, gaunami skirtingų savybių suvirinimo siūlės.

2 Eksperimentinė dalis

2.1 Įvadas

Frikinio virinimo tyrimo eksperimentinė dalis susideda iš dviejų dalių. Pirmoje dalyje matuosime apsirandančias jėgas virinimo metu, nustatomos savybės tarp virinimo parametrų (įrankio sukimosi greičio, skersinės pastūmos) ir išėjimo parametro, tai yra jėgos virinimo metu.

Antroje eksperimento dalyje vertinsime suvirinimo siūlės stiprumo kokybę, atlikinėsime tempimo bandymus. Gautus rezultatus lyginsime su medžiagos tempimo kreive. Bus nustatyti režimai, kurių metu gaunama siūlę yra stipriausia.

Virinimo skerspjūviu išskiriami keli parametrai nusakantis jos kokybe – tai suvirinimo siūlės plotis. Suvirinimo siūlės zonos pateikiamos (2.1 pav.).

Frikinio virinimo metu išsiskirianti šiluma keičia aplink įranki esančia medžiaga. Virinimo metu išsiskyrusio šilumos paveikta medžiaga tampa takesnė, lydosi tokia medžiaga tampa lengviau maišyti. Frikinio virinimo metu išsiskyrusi šiluma ir medžiagų maišymasis medžiaga paveikia skirtingai. Galima išskirti pagrindines 4 terminio poveikio zonas, kurių vaizdas pateikiamas virinimo siūlės skerspjūvyje (2.1 pav.). :

A. Zona, kurios nepaveikia FSW. Tai tam tikras atstumas nuo suvirimo siūlės centro, kuriai susidariusi šilumą neturi įtakos. Nors ši medžiagos dalis ir gali būti paveikta šilumos, bet tai vertinam kaip zoną, kuri neturi įtakos virinimo ciklui. Tai reiškia, kad mikrostruktūros ir mechaninės savybės yra nepasikeitusios. Šią zoną galima vadinti „pagrindine medžiaga“.

B. Terminio poveikio zona (Heat-affected zone (HAZ)) – tai yra zona, kuri yra arčiau suvirinimo siūlės ir yra tikrai yra paveikta šilumos, šioje zonoje yra pakitusios mechaninės savybės. Pastebimi mikrostruktūros pakitimai, bet mikrostruktūroje nepastebimos plastinės deformacijos.

C. Terminio mechaninio poveikio zona (Thermo mechanically affected zone (TMAZ)) – šioje zonoje pastebimi stiprūs mikrostruktūros ir mechaninių savybių pasikeitimai. Tačiau priešingai nei terminio poveikio zonoje (HAZ), terminio poveikio zonoje atsiranda ir plastinės deformacijos. Mikrostruktūros grūdelių dydis panašus į pagrindinės medžiagos grūdelių dydį.

D. Suvirinimo siūlė. Ši zona yra terminio mechaninio poveikio zonos rekristalizacijos zonos dalis. Mikrostruktūros grūdelio dydis šioje zonoje yra žymiai mažesnis negu pagrindinės medžiagos. Pagal Murr ir kitus autorius (Murr, 1998) grūdelio dydis šioje zonoje yra 10 kartų mažesnis, nei pagrindinėje medžiagoje, nuo kurios savybių priklauso suvirinimo siūlės savybės, tokios kaip nuovargio riba. Suvirinimo siūlės forma gali skirtis, ji priklauso nuo virinamos medžiagos ir suvirinimo parametrų. Pasak Bradley ir James (Bradley, 2000) šios siūlės grynuolis

yra šiek tiek didesnis nei įrankio (kuriuo atliekamas virinimo bandymas), bet žymiai mažesnis nei laikiklio diametras. [26]

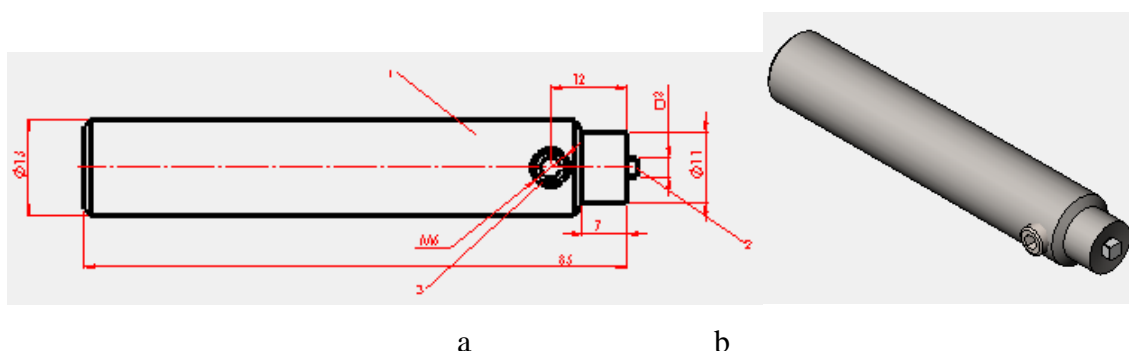


2.1 pav. FSW virinimo zonos [25]

2.2 Eksperimentinė įranga

Eksperimentiniai bandymai buvo atliekami naudojant CNC apdirbimo centrą. Naudojamas 3 ašių apdirbimo centras Leadwell v 20, kurio valdiklis yra Fanuc 18i-MB. Naudojantis šiomis staklėmis bus parašyta programa frikciniam virinimui.

Eksperimentiniuose bandymuose buvo naudojamas įrankis, kuris buvo pagamintas iš greitapjūvio plieno 1,2343 (EN 4957:2000). Įrankio konstrukcija buvo pasiūlyta australų įmonės „Sitritec“. Įrankį sudaro 3 dalys – ašelė su kvadratinio galu (3x3 mm kvadratas), 11 mm skersmens cilindru su 5° įgilinimu ir tvirtinimo smeigės. Įrankio vaizdas yra pateiktas (2.2 pav. a – įrankio vaizdas su matmenimis, b – įrankio erdvinis vaizdas)



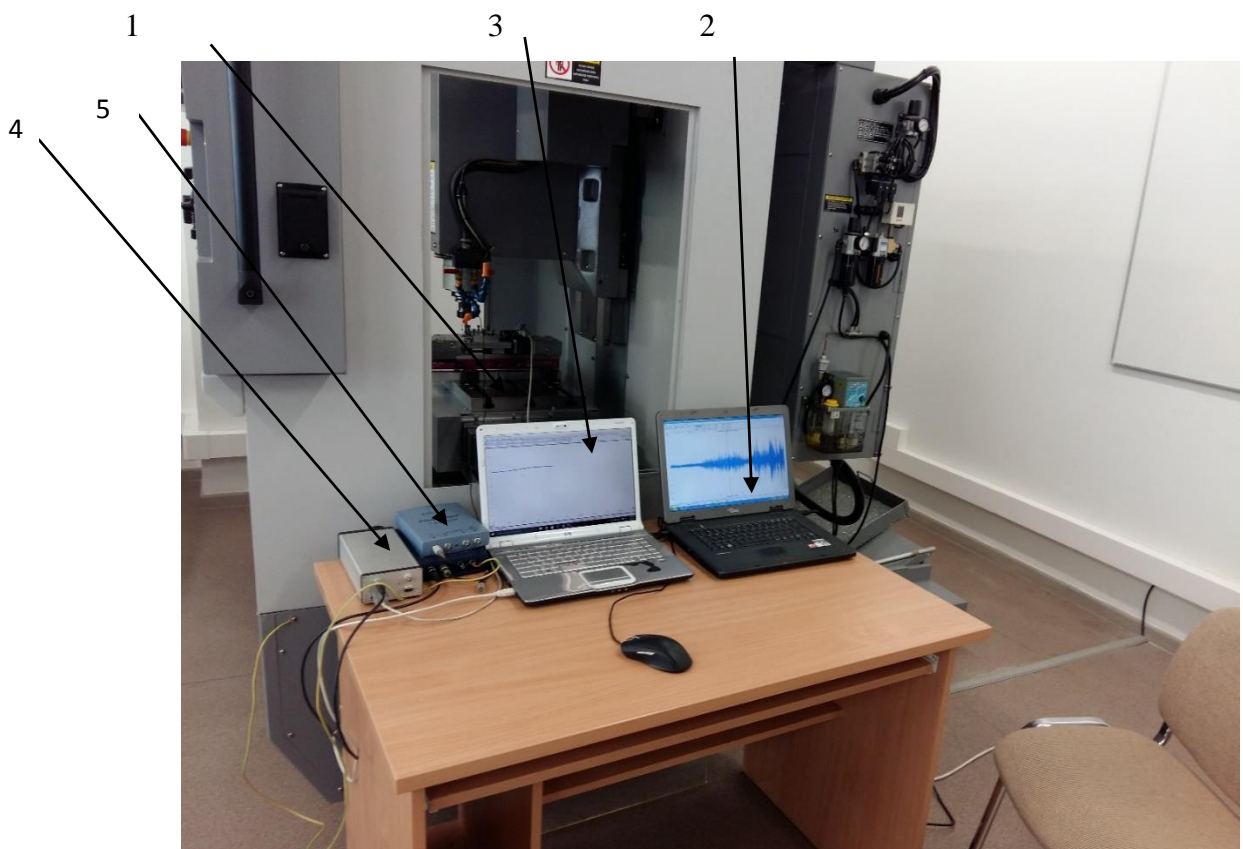
2.2 pav. Frikcinio virinimo įrankis : a) įrankio matmenys ir dalys: 1 – įrankio cilindras; 2 – įrankio ašelė; 3 – tvirtinimo varžtas M6; b) įrankio izometrinis vaizdas.

Suvirinimo metu atsirandančios jėgos matuojamos dinamometru Kistler 9345B. Dinamometru matuojamas poslinkio kitimas. Kistler dinamometro matavimo ribos -10...10 kN.

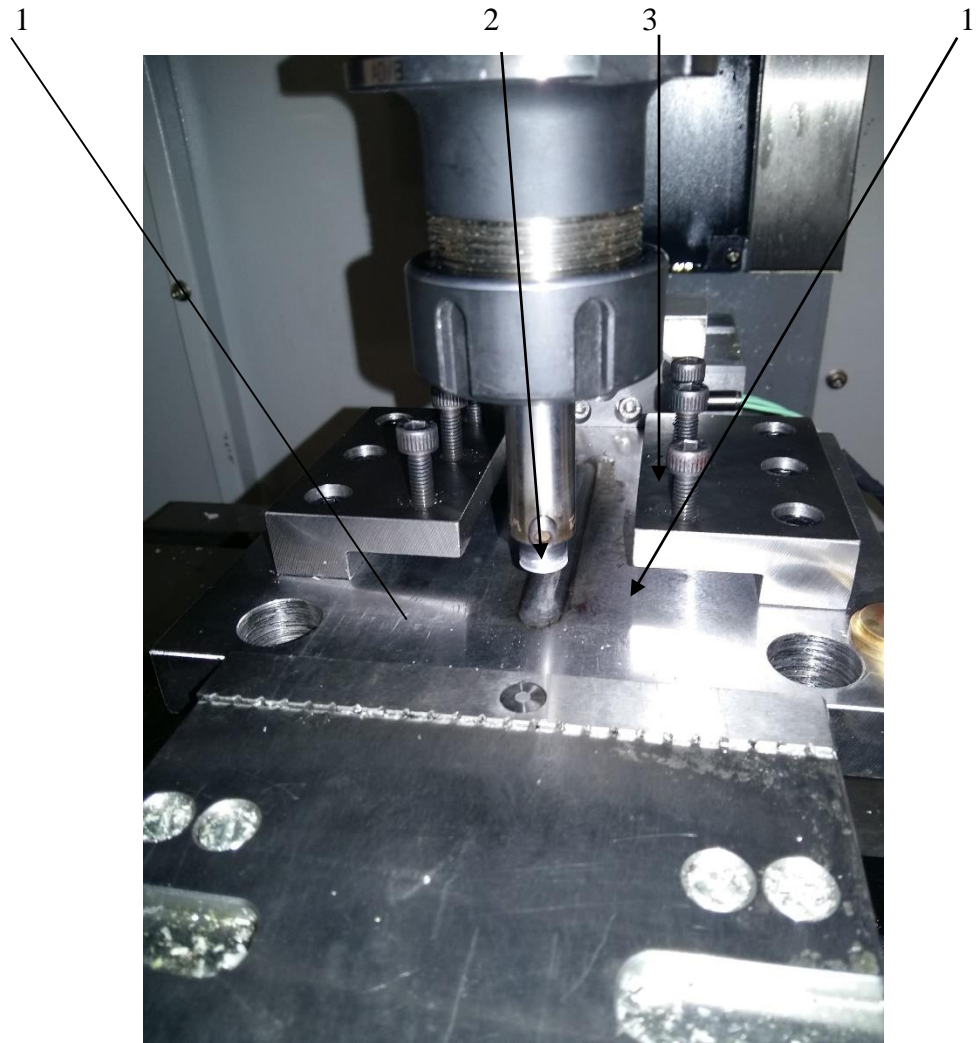
Jautrumas $\sim - 3,7 \text{ pC/N}$. Kistler yra sujungiamas su stiprintuvu signalui, stiprinti naudojamas „Kistler 5018A“ laboratorinis stiprintuvas. Ašinės jėgos pokytis matuojamas „Picoscope 4024“ pagalba. Gauti duomenys įrašomi į kompiuteri naudojantis „Picoscope 6“ programa [29].

Taip pat, prie virinimo ir montavimo įtaiso buvo primontuotas garso daviklis. Davikliu matuojami akustinės emisijos pokyčiai skirtingais virinimo režimais. Daviklis yra jungiamas su „Picoscope 3424“. Gauti duomenys įrašomi į kompiuteri naudojantis „Picoscope 5“ programa.

Bendras dinamometro ir garso daviklio vaizdas yra pateikiamas (2.3 pav.), 1 – virinimo ir plokštelių montavimo įtaisas, 2, 3 kompiuteriai su osciloscop picospoce programomis, 4 – stiprintuvas, 5 – osciloskop picocokope įrenginiai. Montavimo ir virinimo įtaisas pateikiamas (2.4 pav.)



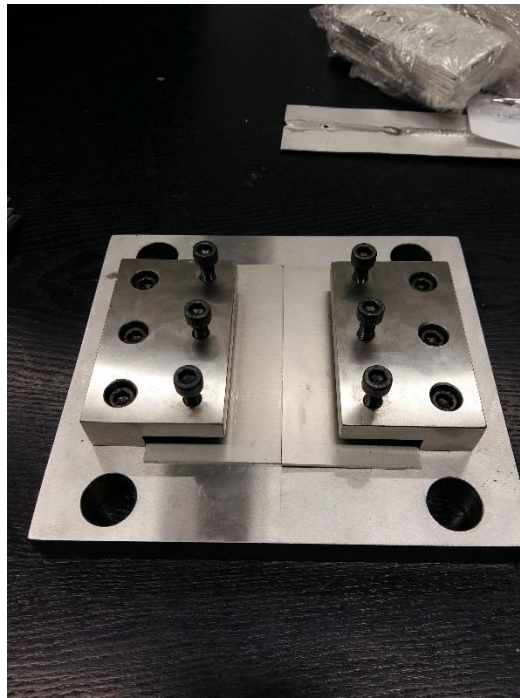
2.3 pav. Bendras tyrimo stendas



2.4 pav. Ruošinių tvirtinimas ir matavimo įtaisas

Bendras ruošinio tvirtinimo ir matavimo įtaiso vaizdas yra pateikiamas (2.4 pav.), 1 – virinamos plokštelės, 2 - įrankis, 3 – matavimo įtaisas .

Suvirinimo metu buvo suvirinami du identiški ruošiniai (plokštelės). Fricinio virinimo bandymams pasirinkta Al 10-50 ir TL091T4 (AlMg5Mn), 1,5 mm storio plokštelės, kurių gabaritiniai matmenys 100x50 mm. Plokštelės įtvirtinamos į virinimo matavimo įtaisą (2.5 pav.). Plokštelės įdėdamos į virinimo įtaisą ir užveržiamos 6 varžtais, kad nejudamai negalėtų judėti jokiais kryptimis.



2.5 pav. Plokštelių tvirtinimo įtaisas

Kaip matyti 2.5 pav. plokštelės yra sudedamos lygiai į vieną tiesę ir užveržiamos varžtais. Plokštelės turi būti įtvirtinamos nejudamai, nes pirminio išigilinimo metu pasireškia didelės jėgos. Plokštelių tvirtinimo įtaisas tvirtinamas į staklių spaustuvus. Įtaisas įveržiamas spaustuvų pagalba prie staklių stalo.

2.3 Eksperimento metodika

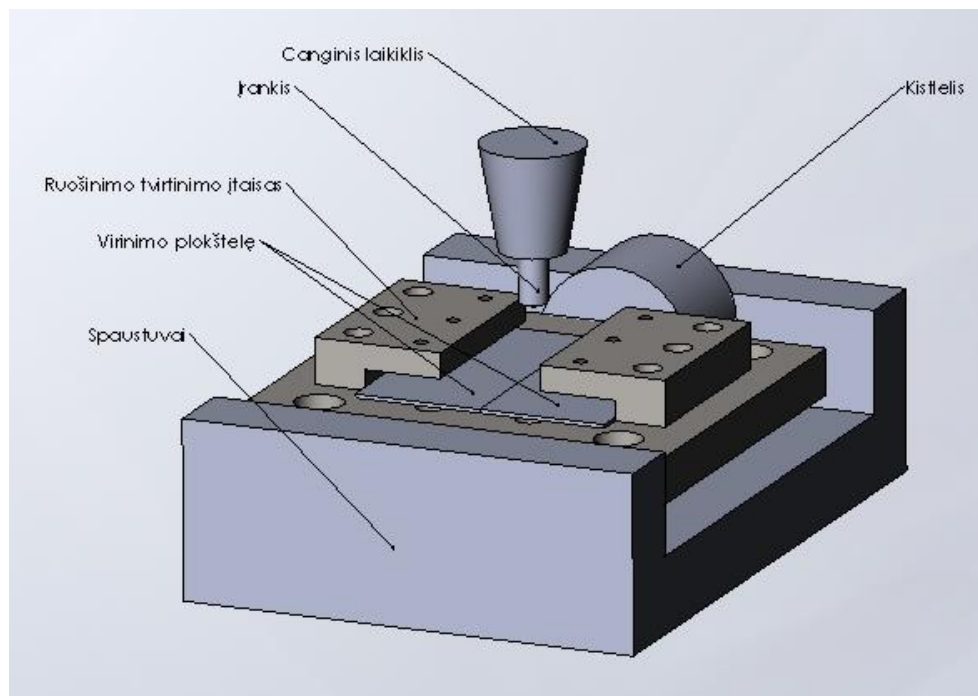
Eksperimentai buvo atliekami remiantis analogiškais frikcinio virinimo moksliniais darbais [18-24;30]. Visi frikcinio virinimo bandymai buvo atliekami analogiškai. Norint gauti kokybiškus rezultatus, buvo sukurta frikcinio virinimo jėgų eksperimento metodika.

Dinamometras ir plokštelių tvirtinimo įtaisas įtvirtinami spaustuose (2.6 pav.). Pradiniu momentu yra suteikiama įvaržą tam, kad virinimo įtaisas išliktų spaustuose, nesujudėtų. Spaustuvai kamertonų pagalbą yra įtvirtinami ant judančio staklių stalo, kuris suteiks virinimo procesui judesį.

Dinamometras yra sujungiamas su stiprintuvu „Kistler 5018A“ A kanalu. Stiprintuvo išėjimas sujungiamas su osciloskopu „Picoscope 4024“ sujungtu su kompiuteriu, kuriame yra įrašyta „Picoscope 6“ programinė įranga [29].

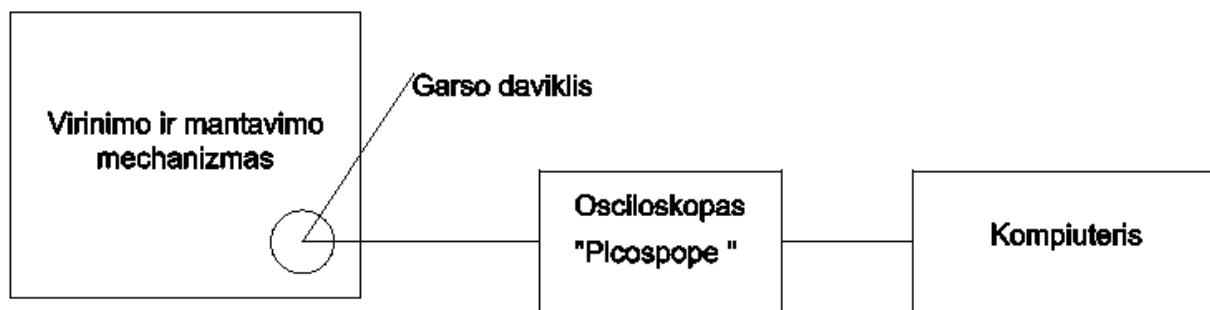
Prispaudus ruošinius (plokšteles) nustatomas įrankio nulinis taškas, kuris yra 10 mm virš ruošinio. Po kiekvieno FSW virinimo proceso nulinis taškas nustatomas Johansono plokštelių pagalba. Programos tekstas yra pridėtas priedė 1.

Atlikus pradinius darbus, tai yra įrangos kalibravimo, programos rašymo, atliekami pradiniai bandymai, kurias bus nustatyti osciloskopo „Picoscope 4024“ įėjimo signalo diapazono nustatymai.



2.6 pav. Tvirtinimo ir matavimo įrangos schema

Garso emisijai tirti, kaip buvo minėta anksčiau, buvo naudojamas garso daviklis, kuris buvo sujungiamas su osciloskupu „Picoscope 3424“, picoscope. Įrenginys buvo sujungtas su kompiuteriu, kuriame yra įrašyta „Picoscope 5“ programinė įranga. Garso daviklio – osciloskopo „Picoscope 3424“ – kompiuterio sujungimo schema pateikiama (2.7 pav.).



2.7 pav. Garso daviklio pajungimo schema.

2.4 Medžiagų charakteristikos

Atlikus pradinę analizę matoma, kad dar yra medžiagų su kuriomis galima atlikti frikcinį virinimą. Pirmiausia buvo nuspręsta virinti aliuminio lydinius. Atsižvelgiant į turimus resursus, pasirinkta virinti EN Al-1050A (2.1–2.2 lentelės) ir Al 5556A (AlMg5Mn) aliuminio lydinius.

2.1 lentelė EN Al – 1050 cheminė sudėtis [25]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Kitų
99,5	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03

2.2 lentelė Kitų šalių žymėjimas Al 10-50 [25]

AL99,5	Austrija
A5	Prancūzija
90001/2[P-AL99,5]	Italija
17010[AL99,5]	Norvegija
1050	Kinija
3,0255 AL99,5	Vokietija
A5	Rusija
1B	Didžioji Britanija

2.3 lentelė TL091T4 (AlMg5Mn) cheminė sudėtis [26]

Si	0,25
Fe	0,4
Cu	0,1
Mn	0,6-1,0
Mg	5,0-5,5
Cr	0,05-0,20
Zn	0,2
Ti	0,05-0,20
Be	0,0003
Kitų medžiagų	0,05
Al	92

2.5 Medžiagų mechaninių charakteristikų nustatymas

Medžiagų savybės priešintis jas veikiančioms jėgų poveikiams, vadinamos mechaniniu atsparumu. Fizinės medžiagų savybės, apibūdinančios medžiagų atsparumą, vadinamos mechaninėmis medžiagų savybėmis. Bandymai, kuriais nustatomas mechaninis atsparumas, vadinami medžiagų mechaniniai bandymai ir jie atliekami su specialia įranga.

Medžiagų savybes apibūdina jų rodikliai: stiprumą – stiprumo riba (trapioms medžiagoms) ir takumo riba (plastiškoms medžiagoms). Tamprumą – proporcingumo riba, tamprumo riba, tamprumo ir šlyties moduliai bei Puasono koeficientas; plastiškumą – takumo riba, santykinis liekamasis bandinio ilgio pokytis, santykinis liekamasis bandinio skerspjūvio ploto pokytis.

Mechaninėms medžiagų savybėms nustatyti bus naudojama Instron E 1000 staklės. Šios staklės veikia elektro pulsiniu būdu. Tai yra keičiama variklio sukimosi kryptis, kad staklės judėtų žemyn arba aukštyn. Instron E 10000 staklių vaizdas pateiktas (2.7 pav.)[27].



2.7 pav. Tempimo mašina Instron E 10000

Instron E 1000 charakteristikos:

- Dinaminė jėga : ± 10000 N (± 2250 lbf);
- Sukimo momento jėga : ± 1000 Nm (± 800 in-lb);
- Maksimalus atsidarymo : 877 mm. ;
- Elektros maitinimas :vienfazis;
- Konfigūracija : Dviejų kolonų su servo pavara viršutinėje dalyje.

Pradiniams tempimo bandymams atlikti bus naudojami anksčiau paminėti aliuminio lydinai. Bandymams atlikti buvo sumodeliuoti tempimo bandymai. Bandiniai buvo modeliuojami atsižvelgiant į standartinius tempimo bandinius. Jie sumodeliuoti taip, kad būtų siaura bandinio tempimo zona, kuri leis užtikrinti vienalytį įtempių būvį. Ruošinio galai išplatinami tvirtinimui staklėse. Bandinyje buvo uždėtas užapvalinimo spindulys $R=5$, kurio paskirtis įtempių koncentracijai mažinti matmenų pasikeitimui zonoje. Tempimo ruošinių brėžinys pateikiamas priedė nr. 2.

Tenzojutiklis

Ruošinys



2.8 pav. Ruošinio tvirtinimas Instron staklėse

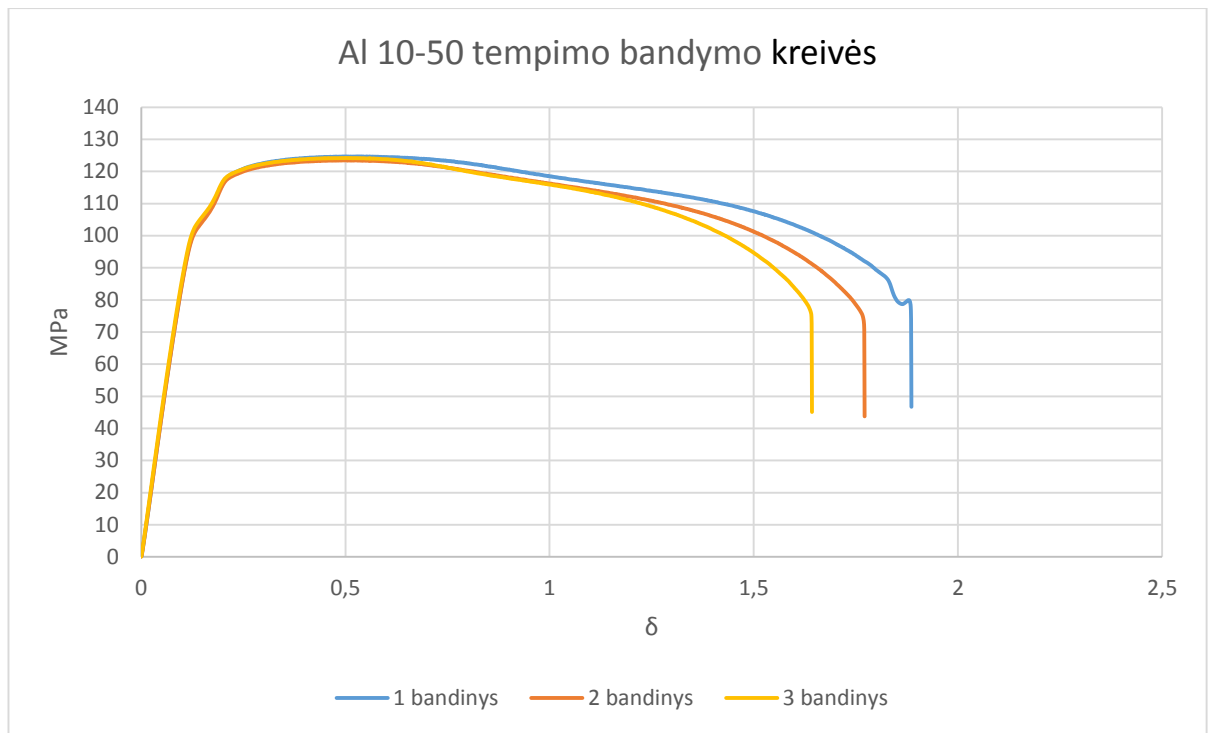
Atlikus statinio tempimo bandymą gautas vaizdas yra pateikiamas (2.9 pav.). Pagal visas tempimo bandymų teorijas bandinys turi nutrūkti ties vidurine tempimo zonos dalimi, arba arčiau vidurio. Jei ruošinys plyšta ties viršutine arba apatine tempimo zonos dalimi, jis laikomas atliktu netinkamai. Bandymas negali būti laikomas tinkamu, todėl jis nėra skaičiuojamas į bandymų rezultatus.

Kaip matyti 2.9 pav. bandinys truko ties vidurine dalimi. Tai galima spręsti, kad tempimo bandymas buvo sėkmingas.



2.9 pav. Trukęs Al 10-50 aliuminio bandynys.

Tempimo bandymams buvo pasirinkta daryti po 3 bandymus su kiekviena iš pasirinktų medžiagų. Atlikus statinio tempimo bandymus gauti rezultatai yra pateikiami grafiškai. Bandymų rezultatai pateikti (2.10 pav. Al 10-50), (2.11 pav. TL091T4(AlMg5Mn)):



2.10 pav. Al 10-50 tempimo kreives

Atlikus statinio tempimo bandymus ir išanalizavus grafiką, galima daryti išvadas apie Al 10-50 aliuminį. Kaip matyti grafike (2.10 pav.) vidutiniai įtempiai, prie kurių jau pradeda formuotis kakliukas yra 125 MPa. Visiškas medžiagos trūkimas įvyksta prie 75 MPa.

Išanalizavus literatūrą rasta medžiagos stiprumo riba yra: >145 MPa [25]



2.11 pav. TL091T4 (AlMg5Mn) tempimo kreivės

Atlikus statinio tempimo bandymus su TL091T4 (AlMg5Mn) aliuminio lydiniu, galima daryti išvadas apie šį aliuminio lydinį. Kaip matyti grafike (2.11 pav.) vidutiniai įtempiai, prie kurių jau pradeda formuotis kakliukas, yra 240 MPa. Kaip matyti grafike, medžiagos trūkimas buvo staigus. Tik pradėjus formuotis kakliukui medžiaga iškarto trūkdavo.

Atlikus literatūros apžvalgą, rasta medžiagos stiprumo riba yra : >270 MPa [26].

Gauti tempimo duomenys bus naudojami tolimesniuose tyrimuose. Gauti duomenys taip pat bus naudojami modeliavimo dalyje, aprašant medžiagos savybes modeliavimo programoje.

Gautos medžiagų mechannes charakteristikos (tamprumo riba, takumo riba, stiprumo riba ir trukimoribos) yra pateikiamos 2.5 lenteleje.

2.4 lentele. Įtempių ribos

	Al 10-50	TL091T4 (AlMg5Mn)
Tamprumo riba MPa	100	120
Takumo riba MPa	106	135
Stiprumo riba MPa	125	240
Trukimo riba MPa	75	230

2.6 Eksperimento rezultatai

Frikcinio virinimo bandymai : Frikcinio virinimo bandymo metu buvo nuspręsta keisti 2 virinimo proceso parametrus – tai yra įrankio sukimosi greitį F (aps/min) ir skersinę pastumą (mm/min). Atlikus literatūros analizę buvo pasirinktas 1,3 mm įrankio įsigilinimo gylis. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad dauguma bandymų atlikta prie mažų įrankio sukimosi greičių, pasirinkti įrankio sukimosi greičiai nuo 2000 – 4000 aps/min. Bandymai atlikinėjami 2000 , 3000 ir 4000 aps/min. Įrankio skersinė pastuma nuo 100 iki 300 mm/min. keičiama kas 100 mm/min. Eksperimentiniai bandymai ir maksimalios jėgos rezultatai pateikiami 2.5 ir 2.9 lentelėse.

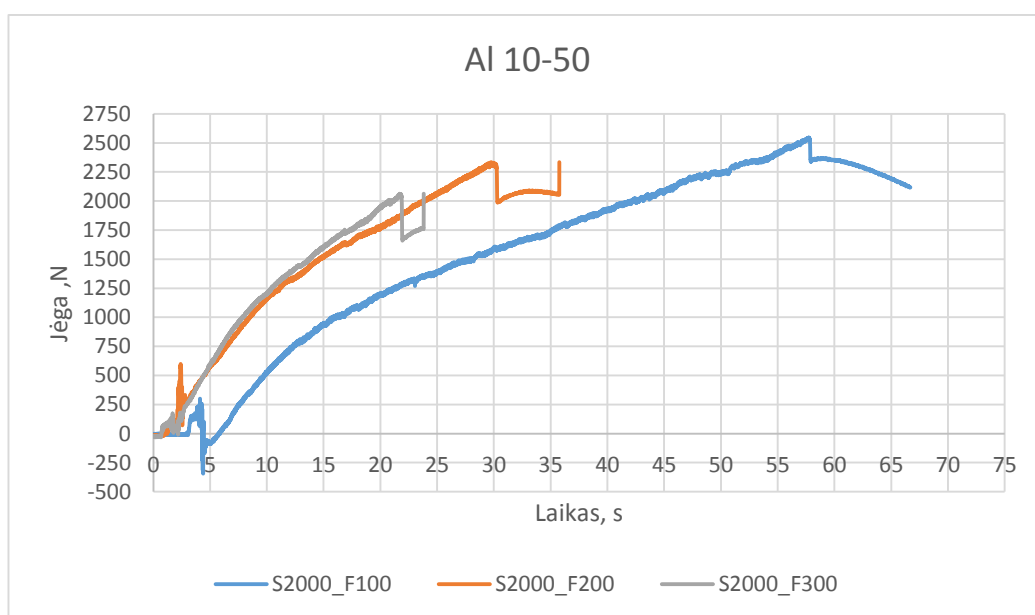
2.6.1 Aliuminio lydinio Al 10-50 bandymo rezultatai

Aliuminio lydinys Al 10-50 labai plačiai naudojamas pramonėje, dėl didelio aliuminio kiekio jis atsparus korozijai, yra plastiškas. Šis lydinys yra naudojamas maisto ir chemijos pramonėse.

2.5 lentelė. Al 10-50 bandymų parametrai ir maksimali jėga.

Eil. Nr.	Medžiaga	Įrankio sukimosi greitis aps/min	Įrankio skersinė pastuma mm/min	Įsigilino gylis mm	Maksimali jėga, N
1	Al 10-50	2000	100	1,3	2547
2		2000	200	1,3	2334
3		2000	300	1,3	2063
4		3000	100	1,3	2611
5		3000	200	1,3	2385
6		3000	300	1,3	2158
7		4000	100	1,3	2690
8		4000	200	1,3	2555
9		4000	300	1,3	2349

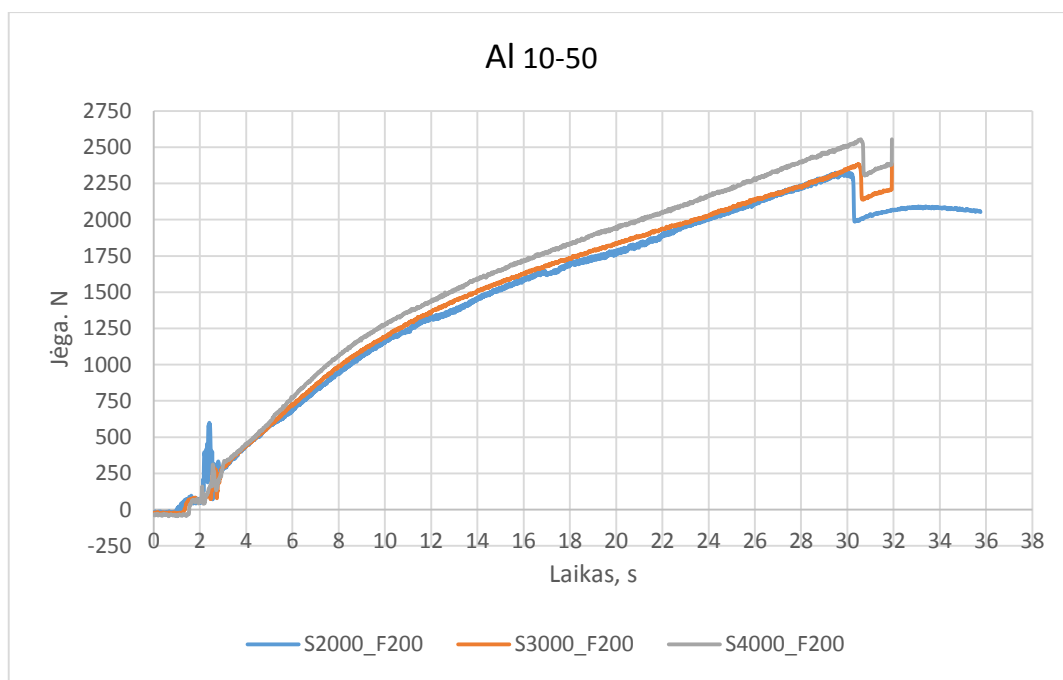
Buvo atlikti visi planuoti virinimo bandymai. Gauti rezultatai surašyti į 2.5 lenteleje. Į lentelę įrašytos maksimalios virinimo jėgų reikšmės.



2.12 pav. Al 10-50 virinimo jėgos

Atlikinėjant duomenų analizę pasirinkta pateikti jėgos kitimo grafiką esant 2000 aps/min. įrankio sūkiams su skirtingomis pastumomis 100, 200 ir 300 mm/min. Gautas jėgos kitimo grafikas pateiktas (2.12 pav.). Kaip matyti suvirinimo proceso metu didžiausias jėgos pokytis buvo kai virintą prie 300 mm/min pastumos. Tai pat esant 300 mm/min. pastumai jėgos kilimo kampas yra stačiausias. Tai reiškia tai, kad jėga pakyla greičiausiai. Tai galima paaiškinti tuo, kad skersinė pastumą sukelia didžiausią jėgos pokytį. Kaip matyti grafikuose, po įrankio išigilinimo jėgą visą laiką didėjo. Tai gali pasireikšti dėl šiluminės deformacijos pasekmės.

Analizuojant atsirandančias jėgas (2.5 lentelė) matyti, kad didžiausios jėgos esant 3000 ir 4000 aps/min., bet, kaip matyti jėgų iš skirtumų tarp 3000 ir 4000, apsisukimams yra minimalus. Prie 200 mm/min. pastuma jėgos skirtumas yra 170 N. Todėl nuspręsta, kad bandymus su didesniais įrankio apsisukimais daryti nevertėtų.



2.13 pav. Al 10-50 virinimo jėgos grafikai.

Norint paanalizuoti jėgos priklausomybę nuo įrankio sukimo greičio, buvo padarytas grafikas su skirtingais įrankio apsisukimais n, bet esant tai pačiai pastumai – 200 mm/min. Analizuojant grafika matyti, kad įrankio išigilinimo procesas yra identiškas, praktiškai vienodas. Įrankiui pradėdant judėti skersine kryptimi matomi nedideli skirtumai tarp grafikų. Grafikai prie 2000 ir 3000 apsisukimų yra praktiškai vienodi. Didžiausia pasireiškianti jėga yra ties 4000 apsisukimais, tad didėjant įrankio apsisukimams jėga didėja.

Analizuojant virinimo bandymų rezultatus buvo nuspręsta paanalizuoti statinės analizės modelį. Virinimo proceso metu buvo keičiami du parametrai, įrankio sukimosi greitis n ir skersinė

pastuma F_y . Remantis gautomis jėgomis nuspręsta, kad jėga koreliuoja su šiais parametrais. Pasirinktas pastaruoju metu palčiai taikomas statinės analizės modelis ANOVA, kurį pasiūlė G.Tagučio.

Šiuo metodu galima nustatyti statinę charakteristikų sklaidą ir daryti išvadas apie parametrus. Parametrų analizė naudojantis ANOVA leidžia sukurti bandymų modelį remiantis mažu bandymų kiekiu. ANOVA įvertina tarpusavio parametrų priklausomybę. Parametrai, kurie statiniame projekte keičiami vadinami faktoriais.

Eksperimento metu pasireiškiančių jėgų kitimo priklausomybes nuo įrankio skersinės pastumos F_y ir įrankio sukimosi greičio n , tai yra dviejų faktorių ir trijų lygčių ANOVA analize. Čia lygtį aprašo 1 formulė.

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad 1$$

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

2.6 lentelė. ANOVA skaidos parametrai.

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F - kriterijus</i>	<i>Įtaka F</i>
Kintamieji	2			102.8006	$2.27981 \cdot 10^{-05}$
Sąveiką	6	342630.7	171315.3		
Viso	8	9998.889	1666.481		
		352629.6			

2.7 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	2511.22	61.6106	40.7595	$1.46 \cdot 10^{-8}$	2360.466	2661.9780
Kintamasis X_1 (n)	0.1083	0.0166	6.5003	0.000631	0.067	0.1491
Kintamasis X_2 (F_y)	-2.13	0.1666	-12.7807	$1.41 \cdot 10^{-3}$	-2.537	-1.7222

Statinė analizė, kaip ir buvo manyta, priklauso nuo pasirinktų koeficientų. Šie parametrai su 95 % tikimybe daro įtaką suvirinimo procesui.

Atlikus statinę analizę ANOVOS metodu galima teigti, kad pastūma turi didesnę įtaką jėgai, nei sukimosi greitis n . Statinės analizės modelis gali būti aprašomas 2 formule, įvertinus visus koeficientus ir kintamuosius.

$$F_s = 2511.22 + 0.1082 \cdot n - 2.13 \cdot F_y \quad 2$$

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

Pagal 2 formulę apskaičiavus jėgą ji surašoma į 2.8 lentelę tam, kad būtų galima palyginti eksperimento metu ir skaičiavimo metu gautas jėgas. Kaip matyti 2.7 lentelėje jėgų skirtumas tarp eksperimentinių ir apskaičiuotų jėgų nėra didelis, didžiausias skirtumas yra 45 N. Vertinant nedideli skirtumą tarp jėgų, galima teigti, kad gauta formulė yra tinkama skaičiavimams. Naudojantis šiuo tyrimu ir formule galima sumažinti bandymų skaičių, o tai atpigina tyrimą ir leidžia taupyti lėšas.

2.8 lentelė. Eksperimentinės ir apskaičiuotų jėgų palyginimas

Įrankio sukimosi greitis (X1 – n) aps/min	Skersinė pastuma (X2 – Fy) mm/min	Eksperimento metu gautos jėgos N	Apskaičiuotos jėga anova N
2000	100	2547	2514
2000	200	2334	2301
2000	300	2063	2088
3000	100	2611	2622
3000	200	2385	2409
3000	300	2158	2196
4000	100	2690	2730
4000	200	2555	2517
4000	300	2349	2304

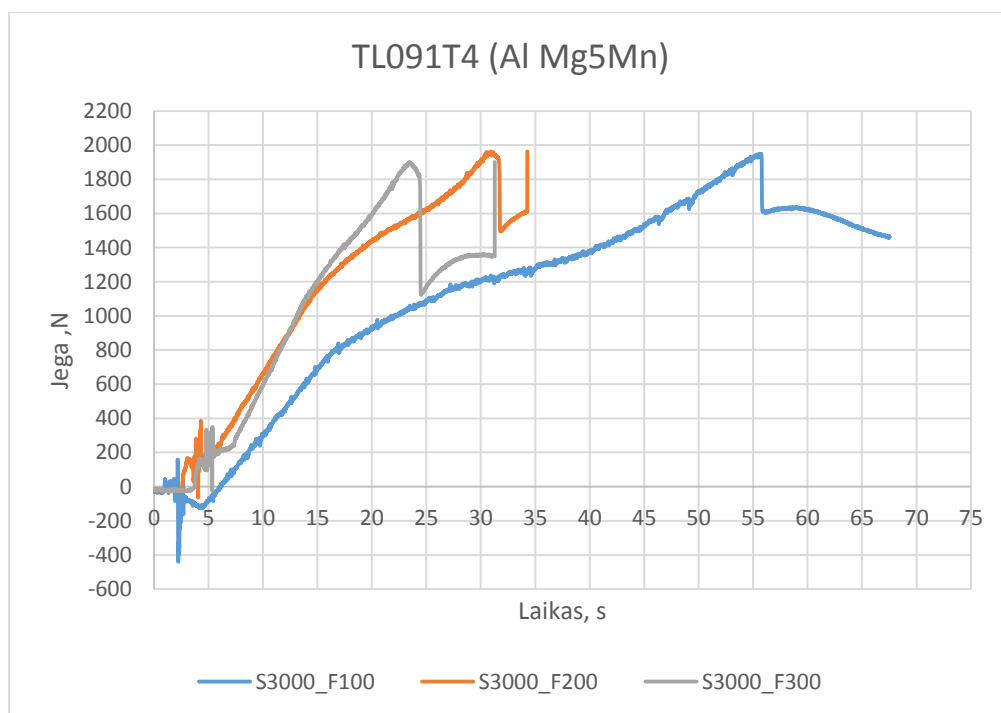
2.6.2 Aluminio lydinio TL91T4(AlMg5Mn) bandymo rezultatai

Aluminio lydinys TL91T4(AlMg5Mn) yra vienas iš nedaugio aliuminio lydinių, kurie yra naudojami šampuotų detalių pramonėje. Šios markės aliuminio lydiniai yra naudojami tokiuose garsiose automobiliuose kaip AUDI, „Volkswagen“ ir kituose. Šio tipo aliuminio lydinys taip pat yra naudojami virinimo procesuose.

2.9 lentelė. TL091T4 (AlMg5Mn) bandymų parametrai ir maksimali jėga.

Eil. Nr.	Medžiaga	Įrankio sukimosi greitis aps/min	Įrankio skersinė pastuma mm/min	Įsigilino gylis mm	Maksimali jėga, N
1	TL091T4 (AlMg5Mn)	2000	100	1,3	1157
2		2000	200	1,3	1273
3		2000	300	1,3	1324
4		3000	100	1,3	1950
5		3000	200	1,3	1963
6		3000	300	1,3	1900
7		4000	100	1,3	1994
8		4000	200	1,3	1348
9		4000	300	1,3	-

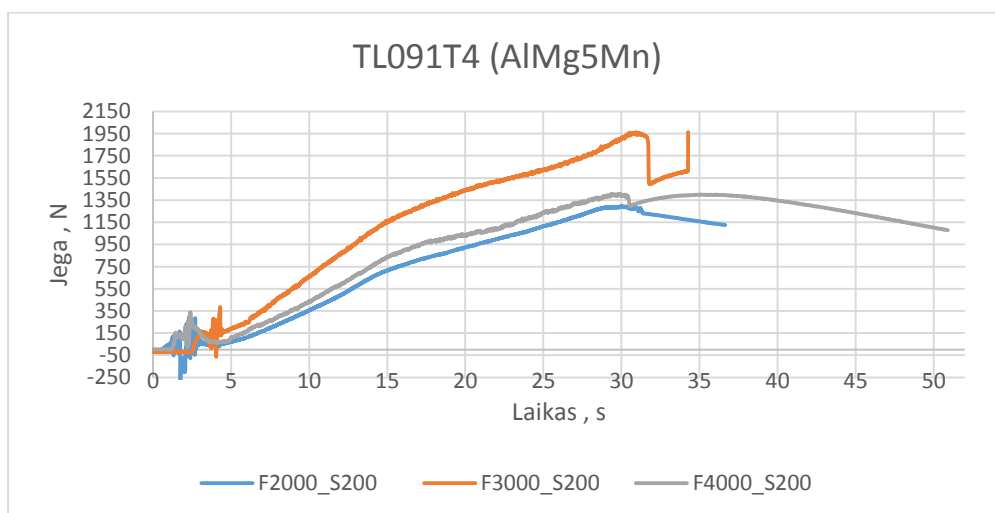
Bandymas prie 4000 aps/min., 300 mm/min. pastumos buvo nedarytas. Buvo pastebėta, kad jau prie 200 mm/min. pastuma virinimo siūlė ne vientisa, matėsi tuščios ertmės.



2.14 pav. TL091T4 virinimo jėgos grafikai.

Atlikinėjant duomenų analizę pasirinkta pateikti jėgos kitimo grafiką, esant 3000 aps/min. įrankio sūkiams su skirtingomis pastumomis 100,200 ir 300 mm/min . Gautas jėgos kitimo grafikas pateiktas (2.15 pav.). Kaip matyti suvirinimo proceso metu, didžiausias jėgos pokytis buvo kai virinta prie 300 mm/min. pastumos. Tai pat, esant 300 mm/min. pastumai, jėgos kilimo kampas yra stačiausias. Tai reiškia tai, kad jėga pakyla greičiausiai. Tai galima paaiškinti tuo, kad skersinė pastuma sukelia didžiausia jėgos pokytį. Kaip matyti grafikuose, po įrankio išigilinimo jėga visą laiką didėjo. Tai gali pasireikšti dėl šiluminės deformacijos pasekmės.

Analizuojant atsirandančias jėgas (2.9 lentelė) matyti, kad didžiausios jėgos yra esant 3000 ir 4000 aps/min. Bet, kaip matyti jėgų skirtumas esant tarp 3000 ir 4000 apsisukimams yra minimalus. Prie 100 mm/min pastumos jėgos skirtumas tik 40 N. Todėl nuspręsta kad, nedaryti bandymų su didesniais įrankio apsisukimais nevertėtu. Kaip buvo pastebėta jau esant 4000 aps/min, 200 mm/min pastumai, virinimo procesas jau buvo blogas. Tai yra įrodo prielaida dėl įrankio apsisukimu didinimo.



2.15 pav. TL091T4 virinimo jėgos grafikai.

Norint paanalizuoti jėgos priklausomybę nuo įrankio sukimo greičio, buvo padarytas grafikas su skirtingais įrankio apsisukimais n, bet esant tai pačiai pastumai – 200 mm/min. Analizuojant grafika matyti, kad įrankio išigilinimo procesas yra panašus. Įrankiui pradėdant judėti skersine kryptimi pasireiškia skirtingas jėgų kitimas. Matyti, kad didžiausia pasireiškianti jėga yra ties 3000 apsisukimais. Bet žinant, kad virinant 4000 apsisukimais virinimo procesas jau buvo blogas. Taigi negalima daryti tikslių išvadų. Bet matyti, kad didėjant įrankio apsisukimams, jėga didėja.

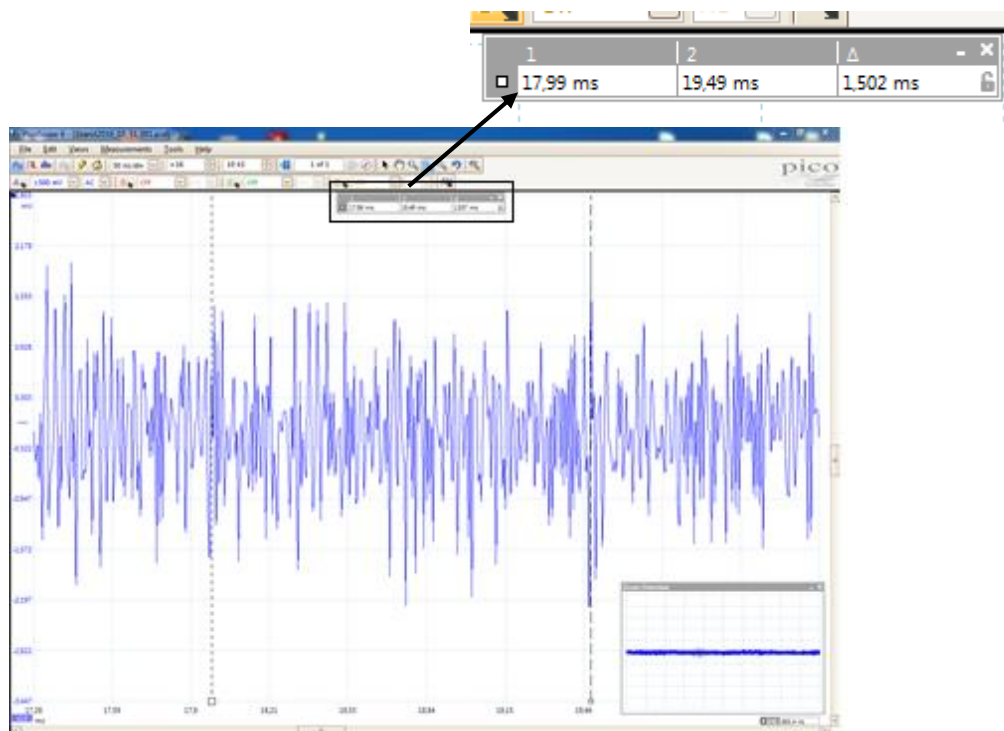
2.7 Eksperimentinė garso emisijos analizė

Akustinės emisijos matavimo metodika taikytina tyrimams, susijusiems su gamybos procesais, akustinės emisijos duomenys susiję su mechaninio apdirbimo operacijomis. Medžiagų apdirbimo duomenys susiję su plastinėmis medžiagos savybėmis ir paviršiaus trintimi. Įrankio judėjimas, kontaktavimas tarp įrankio ir plokštelių paviršių suteikia intensyvius akustinės emisijos pokyčius. Bet koks kontaktavimo pokytis proceso metu modifikuoja arba pateikia energijos pokyčius proceso metu. Frikcinio virinimo metu medžiagų judėjimas ir paviršių trintis dėl įrankio sukimosi turi įtakos akustinės emisijos signalo parametrams.

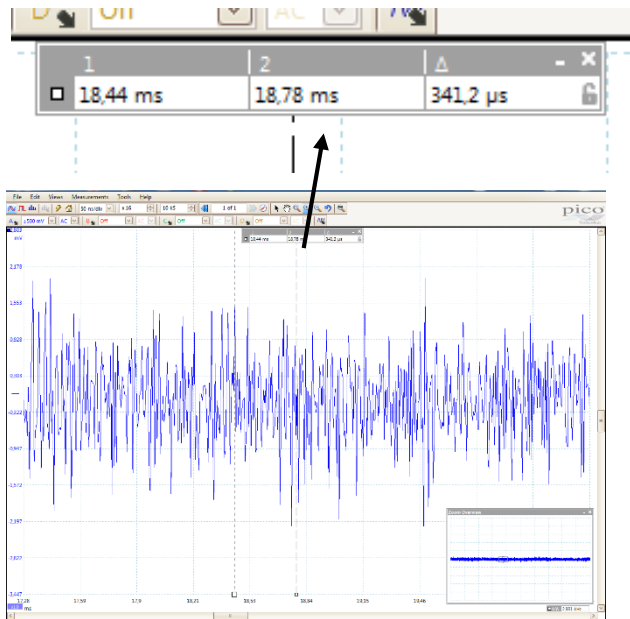
Frikcinio virinimo eksperimento metu naudotas KTU (Kauno Technologijos universiteto) gamybos jutiklis. Jutiklio dažnių juosta 100 Hz – 2MHz. Jutiklis tvirtinamas ant pagrindines plokštės su kljais.

Naudojantis osciloscopo „Picoscope 3424“ programa kiekvieno eksperimentinio bandymo metu, buvo fiksuojami ir įrašinėjami gauti duomenys.

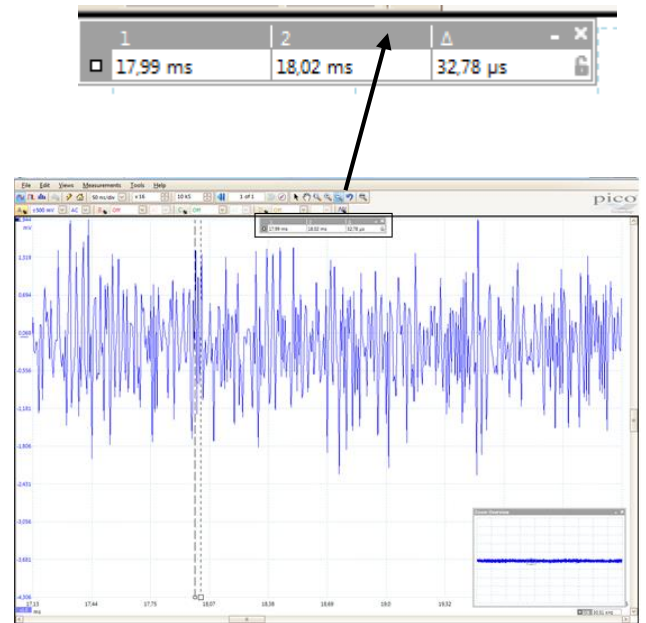
Naudojantis programine įranga buvo išanalizuojami duomenys. Duomenų analizės vaizdai pateikiami (2.16.-2.18 pav.). Matuojamas vaidas tarp pulsacijų pateiktas vaizde (2.16 pav.). Amplitudės reikšmė (P-P) matavimo vaizdas pateikiamas (2.18 pav.)



2.16 pav. Pasikartojančio ciklo matavimo laikas.

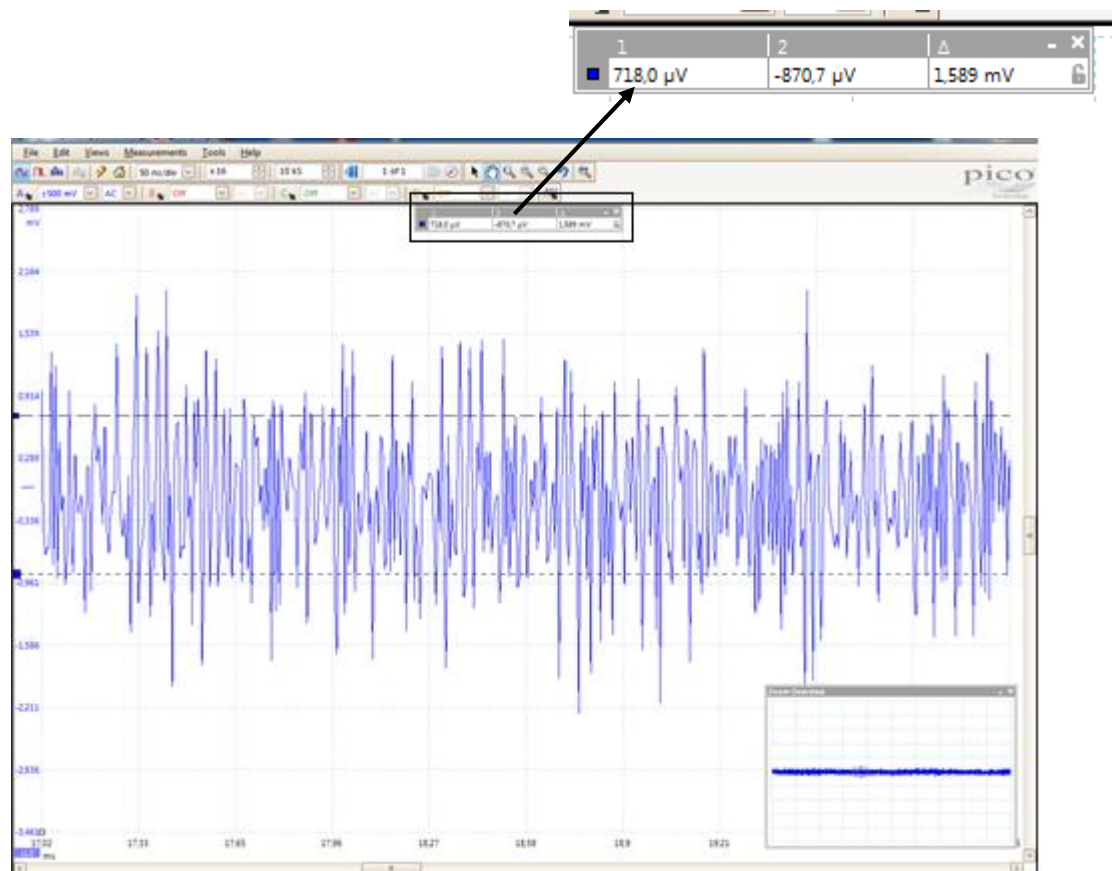


a



b

2.17 pav. a- pasikartojančios pulsacijos matavimo laikas; b - laiko tarpas tarp trumpiausių garso emisijos pasikeitimų.



2.18 pav. Amplitudės (P-P) matavimas.

Atlikinėjant laiko emisijos analizę buvo pasirinktas vienas iš frikcinio virinimo bandymų, kurio virinimo parametrai buvo $n = 3000$ aps/min. ir 100 mm/min. pastuma. 2.16 – 2.18 paveikslėliuose yra pateikiamas vieno iš įrenginio mazgo virpesiu (pagreičio signalo) laiko skleistinės. Amplitudės (P-P) matavimo vaizdas yra pateikiamas 2.18 pav. parenkamas vidutine pliūpsnių verte.

Likusių virinimo procesų laiko emisijos matavimo analizė atliekama analogiškai, kaip parodyta (2.16 – 2.18 pav.). Gauti matavimo rezultatai yra pateikiami (2.10 lentelėje).

2.10 lentelė. Garso kitimo bandymų rezultatai

	Medžiaga	Įrankio sukimosi greitis aps/min	Pastuma mm/min	Pasikartojančio ciklo tarpas ms	Pulsacijos ciklo tarpas ms	Trumpiausio svyravimo ciklo tarpas ms	Amplitudė (P-P) mV
1	Al 10 - 50	3000	100	1,5	0,341	0,036	1,6
2	Al 10 - 50	3000	100	1.277	0,257	0,029	4,8
3		3000	200	1,35	0,260	0,018	4,2
4		3000	300	1,6	0,240	0,011	3,5
5		4000	100	0,8	0,262	0,005	5,9
6		TL091T4 (AlMg5Mn)	3000	100	0,740	0,378	0,006
7	3000		200	0,814	0,309	0,009	2,8
8	3000		300	1,103	0,379	0,010	2,6

1 bandymo metu buvo kalibruojamos osciloscopas picoscopas, nustatomas įėjimo signalo diapazonas. Jo rezultatai, gali būti, nėra teisingi. Gautais matavimo rezultatais nėra remiamasi.

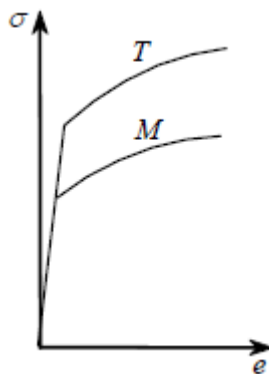
Analizuojant gautus rezultatus matome, kad didėjant pastumai didėja ir pulsacijų tarpas. Virinant abejas medžiagas tiek Al 10-50, tiek TL091T4 (AlMg5Mn), vienodais režimais rezultatų kitimas yra identiškas, tik skiriasi jų skaitinės reikšmės. Pastumai esant 100 ir 300 pulsacijų tarpas ms yra labai artimi vienas kitam. Tai galima manyti, kad pasireiškia labai panašus garso kitimo sinusoides grafikais.

Žiūrint į išmatuotus amplitudės vertes mV, matyti, kad didėjant pastumai mažėja amplitudės reikšmė. Virinant Al 10 – 50 didinant pastuma nuo 100- 300 amplitudė kiekvienu atveju mažėja ~ 0,6 mV. Virinant TL091T4 (AlMg5Mn) medžiaga analogiškai kaip ir AL 10-50 didinant pastumą amplitudės reikšmės mažėja, tačiau mažėjimas nėra toks pastebimas kaip Al 10-50, jis yra - 0,1 mV kiekvienu atveju.

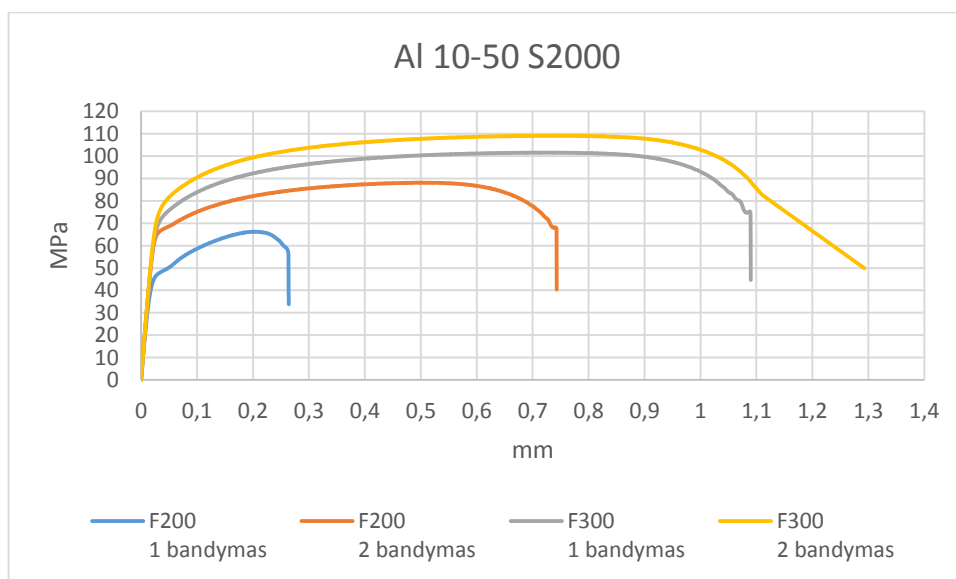
2.8 FSW bandiniu tempimo analizė

Frikiniam suvirinimo sujungimui būdingas mechaninis nevienalytiškumas t. y. virinimo zonos (pagrindinis metalas, terminio poveikio zona, terminio mechaninio poveikio zona, suvirinimo siūlė), suvirinimo zonos yra 2.1 skyriuje, kurių mechaninės stiprumo charakteristikos yra didesnės arba mažesnės už pagrindinio metalo.

2.19 pav. yra parodytas tempimas esant suvirintajam sujungimui. Pagrindinio metalo tempimo stiprumo kreivė pažymėta T, virinimo siūlės tempimo stiprumo kreivė pažymėta M. Tempiant tokį sujungimą pirmiausia siūlė pradės formuotis plastiškai, nes jos σ_{pr} yra mažesnė už pagrindinio metalo σ_{pr} .

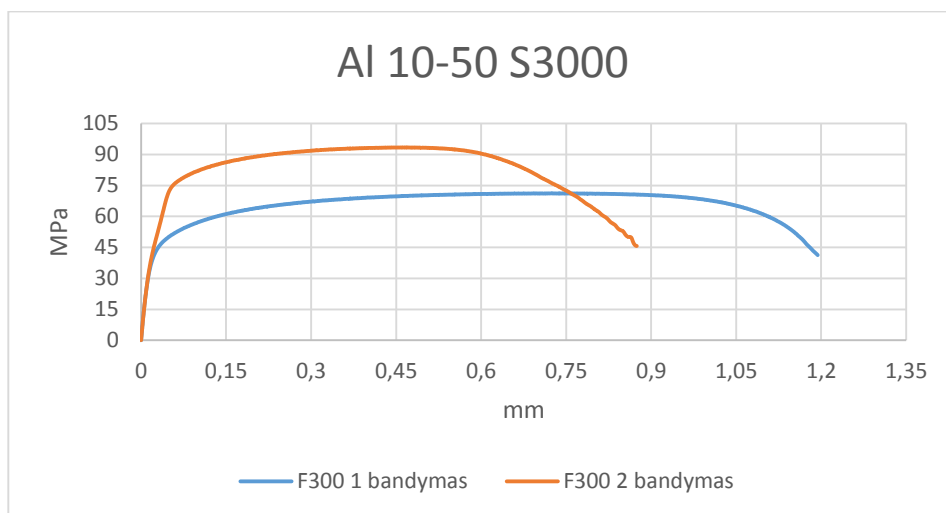


2.19 pav. Nevienalyčių suvirintų elementų tempimo kreivė



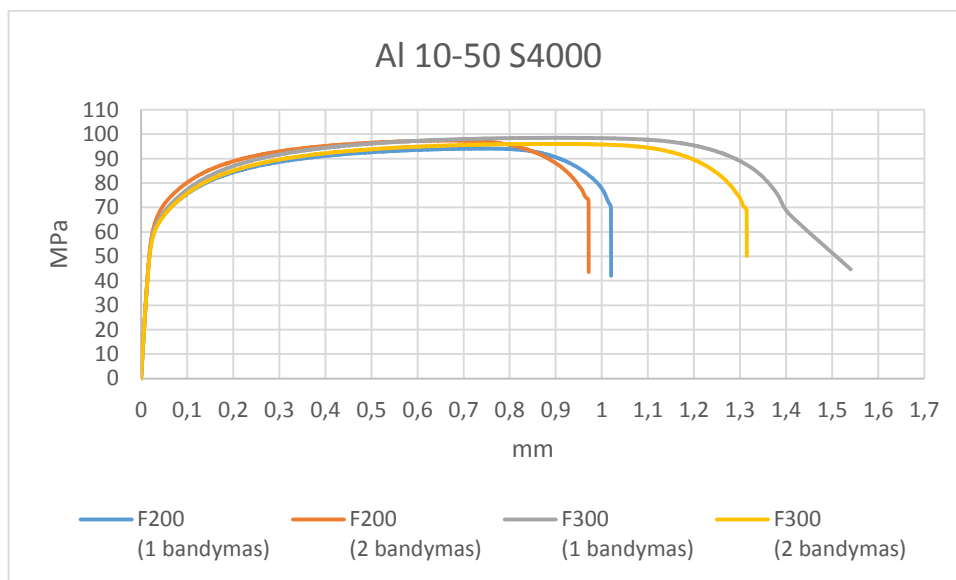
2.20 pav. Al 10 -50 Tempimo kreivė esant n= 2000

Atlikus Al 10-50 medžiagos tempimo bandymus, esant 2000 apsisukimams skirtingomis pastumtomis (200 ir 300), matyti, kad tempimo kreivės stipriai skiriasi. Vieno iš bandinio stiprumo riba yra 68 MPa (2.20 pav.), lyginant su normalios medžiagos stiprumo riba ji yra labai maža. Kaip matyti grafike (2.20 pav.), kreivės yra skirtingos prie tų pačių virinimo režimų. Tempimo bandiniai buvo pjauti iš tų pačių plokštelių. Tai būtų galima aiškinti tuo, kad virinimo siūlė nėra tolygi.



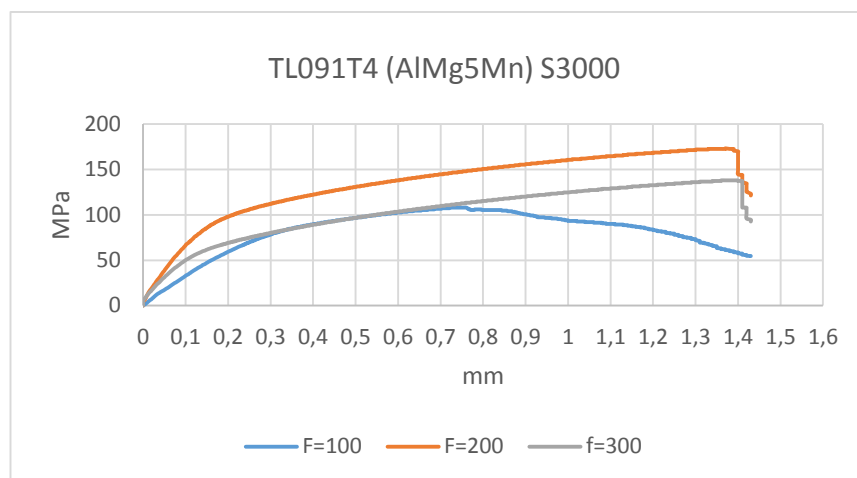
2.21 pav. Al 10 -50 Tempimo kreivė esant n= 3000

2.21 pav. yra analogiškas 2.20 pav. Bandiniai buvo pjauti iš tų pačių virintų plokštelių. Kaip matyti graike stiprumo riba skiriasi apie 20 MPa. Tai pat gaunama nevientisa virinimo siūlė.



2.22 pav. Al 10 -50 Tempimo kreivė esant n= 4000

Tempiant bandinius esant 4000 aps/min. grafikai gaunami identiški 2.22 pav. Virintu bandiniu skirtingomis prastumomis stiprumo ribos yra vienodos ir siekia apie 100 MPa. Skirtumas neženklus. Tai galima manyti, kad virinimo siūlė yra vientisa.



2.23 pav. TL091T4 (AlMg5Mn) Tempimo kreivė esant n= 3000

TL091T4 medžiagos virintos prie 3000 aps/min., grafikas pateikiamas 2.23 pav. Kaip matyti grafike, prie skirtingų pastumų gaunamos skirtinga stiprumo riba. Silpniausia virinimo siūlė gavosi prie 100 mm/min. pastumos. Stipriausia siūlė gavosi prie 200 mm/min. pastumos. Jos stiprumo riba σ – 173 MPa.

2.11 lentelė. Virintų medžiagų stiprumo ribos esant skirtingiems režimams

Medžiaga	Apsikukimai aps/min	Pastuma mm/min	Stiprumo riba MPa	Stiprumo riba nevirintos medžiagos MPa
Al 10-50	2000	200	66.2	125
		200	88.1	
		300	101.51	
		300	109.45	
	3000	300	71.17	
		300	93.42	
	4000	200	94.15	
		200	97.43	
300		98.55		
300		96.05		
TL091T4	3000	100	108	240
		200	173.33	
		300	138	

Kaip matyti 2.11 lentelėje esant skirtingiems virinimo režimams gaunamos skirtingos stiprumo ribos. Al 10-50 medžiagos virintos siūlės geriausia stiprumo riba gavosi virinant esant ($n=2000$, $F_y=300$) režimams, jos stiprumo riba gavosi labai artima normalios medžiagos ribai t. y. σ 109 MPa. Vienodžiausia virinimo siūlė gavosi virinant esant ($n=4000$; $F_y = 200$ ir $F_y = 300$) abejomis pastumomis gauta stiprumo riba siekia 100 MPa. TL091T4(AlMg5Mn) aliuminio lydinio stipriausia siūlė gavosi esant 200 pastumai, gauta stiprumo riba siekia σ 173 MPa.

2.9 Eksperimentinės dalies išvados

Atlikti medžiagų (Al 10-50 ir TL091T4(AlMg5Mn)) mechaninių charakteristikų nustatymai t. y. takumo riba, stiprumo riba.

Atlikus virinimo bandymus sudarytos jėgų priklausomybės nuo parametrų kitimo. Nustatyta, kad įrankio sukimosi greitis turi didesnę įtaką virinimo procesui, nei skersinė pastuma. Tai įrodyta naudojantis ANOVA metodų. Tyrimas su ANOVA darytas tik Al 10-50, bet gautais rezultatais galima remtis abejoms medžiagoms Al 10-50 ir TL091T4 (AlMg5Mn).

Atlikti virintų medžiagų tempimo bandymai. Gauti rezultatai parodė, kad gautos suvirinimo siūlės stiprumas yra silpnesnis už standartines medžiagos. Vieni iš bandymu gauta, kad siūlės stiprumas yra artimas standartini medžiagos stiprumo ribai.

3 Frikcinio suvirinimo modeliavimas

3.1 Įvadas

Frikcinio virinimo metu tarpusavyje tarp kontaktuojančių kūnų (virinamu plokštelių ir įrankio) atsiranda šiluminis laidumas – tai yra šilumos perduodama per tiesiogiai besiliečiančius kūnus. Baigtiniuose elementų modelio sudarymui naudojamos programos pagrįstos baigtinių elementu modeliu, kuriuose yra įvertinamas šilumos susidarymas ir kontaktuojančių paviršių įvertinimas. Skaičiavimo modelio sudarymui didžiausią reikšmę turi tinkamo metodo parinkimas, kuris geriausiai įvertintų kūnų kontaktavimą ir atsirandančias jėgas – įtempius. Šio tyrimo modeliavimui pasirinkta naudoti Dassault Systemes šeimos programą, Abaqus programinę įrangą, kurioje galima modeliuoti laiko metu kintančius procesus, išorinius poveikius procesui, nustatyti kontaktuojančius paviršius. Modeliui apibrėžti naudojamos formuluotės, kurios tiksliai aprašo modelį – jis kitaip vadinamas „Explicit“ metodu. Šis skaičiavimo metodas skiriasi nuo standartinio skaičiavimo „implicit“ modelio.

Abaqus/explicit programinis paketas sudarytas remiantis baigtinių elementų metodu ir yra naudojamas apskaičiuoti laiko momentu kintamus dinامينius procesus, skirtingomis fizikinėmis savybėmis tirti. Šis modeliavimo metodas tinkamas įvairiems kvazistatiniams reiškiniams tirti. Naudojantis šia programa tinkamai galima apibrėžti pereinamuosius procesus, kuriuose yra netiesinės priklausomybės. Šio metodo privalumas, palyginus su standartiniu (implicit) metodu, yra tai, kad sutaupoma kompiuterio resursų, kai kuriuose kontaktiniuose uždaviniuose standartinis skaičiavimo modelis turi sunkumų pasirenkant priartėjimo tikslumą. Iš to galima matyti, kad sprendžiant dinامينius uždavinius teisingiausia naudoti „explicit“ metodą – taip sutaupomas laikas, kompiuterio resursai ir tikimybės suklysti nustatant kontaktus.

Abaqus programinė įranga patogi naudoti vartotojui. Abaqus programa galima sukurti skaičiuojamąjį modelį, jį aprašyti ir išspręsti norimus uždavinius. Modelio skaidymas baigtiniais elementais nesudėtingas, paprastas. Programoje jie aprašomi aiškiai. Privalus Abaqus programoje yra skaičiavimo paprastumas ir lengvai prieinama informacija. Atsižvelgiant į šiuos privalumus, frikcinio virinimo modelis modeliuojamas naudojantis Abaqus/expliciti programinės įrangos pagalba.

3.2 Modeliavimo metodika

3.2.1 Skaičiavimo modelis ir formulės

Frikinio suvirinimo modeliavimo metu įvardinami kietųjų kūnų dalelių ryšiai, terminės medžiagos savybės, kontakto taškai. Suvirinant frikcinio būdu šiluma gaunama dviem būdais – plastinių deformacijų ir suvirinimo įrankio bei medžiagos kontakto vietoje atsirandančios trinties. Didžioji dalis atrandančios šilumos yra dėl trinties tarp įrankio ir suvirinamos medžiagos ir sudaro 98 – 99 % išsiskiriančios šilumos. Šilumos sklidimas medžiagoje gali būti aprašomas formule (1):

$$v \quad (1)$$

kur ρ – medžiagos tankis, c – specifinė šiluma, T – temperatūra, t – laikas, k – šilumos laidumo koeficientas x, y, z kryptimis, q_f

išsiskiriantis šilumos kiekis dėl trinties gali būti apskaičiuojamas taip (2 formule) :

$$q_f = \int_0^T \omega T_f \quad (2)$$

kur ω – įrankio kampinis sukimosi greitis, T_f trinties momentas suvirinimo metu.

Suvirinimo metu atsirandančios šiluminio poveikio medžiagos mechaninės, charakteristikos kinta. Modeliuojant suvirinimo procesą būtina įtraukta šilumos poveiki medžiagai, medžiagos poveiki šilumai galima aprašyti Johnson Cook parametrais. Johnson Cook parametrai leidžia nustatyti medžiagos atsaką ne tik į temperatūrą, taip pat ir į deformacijas, deformacijų kitimo greitį.

Empirine Johnson Cook modelio lygtis yra užrašoma (3 formule):

$$\sigma_y = A \left[1 + \frac{B}{A} (\epsilon^{-pl})^n \right] \left[1 + C \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right)^{-pl} \right] \left[1 - T_H^m \right] \quad (3)$$

Kur : σ_y – takumo riba, ϵ^{-pl} - ekvivalentinės plastinės deformacijos, $\dot{\epsilon}^{-pl}$ - ekvivalentinės Plastinės deformacijos greitis, ϵ_0^{-pl} - normalizuotas deformacijos greitis, T_H^m - temperatūrinis koeficientas, kuris priklauso nuo (A, B, n, C, m parametru), šią temperatūrą galima apskaičiuoti naudojantis (4 formule)[33].

$$T_H^m = \frac{(T - T_a)}{(T_l - T_a)} \quad (4)$$

kur T - , T_a - aplinkos temperatūra, T_l – lydimosi temperatūra,

Suvirimo modelyje pasirinkta Al 10-50 aliuminio medžiaga. Šios medžiagos jau yra nustatyti Johnson Cook parametrai [32]. Aliuminio Al 10-50 lydinio Johnsono Cook medžiagos parametrai pateikiami 3.1 lentelėje :

3.1 lentelė. Aliuminio Al 10 – 50 Johnson Cook parametrai.

A(Pa)	B(Pa)		n	C	m	$T_m(K)$	$C_p(J/kg K)$
110	150		0,360	0,014	1	918,15	899

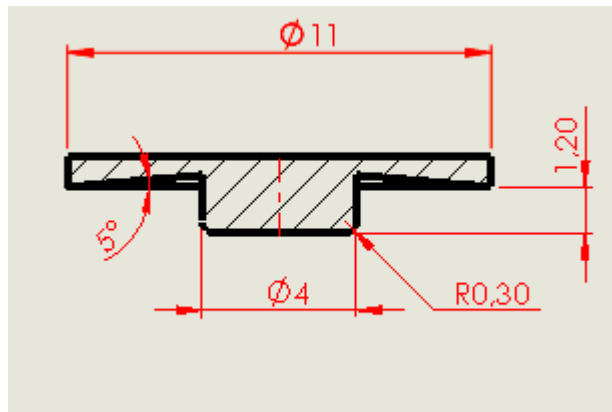
3.2 lentelė. Aliuminio Al 10 – 50 medžiagos parametrai [25].

Parametras	Reikšmė	Vienetas
Tankis	2710	Kg/m^3
Jungo modelis	69	GPa
Lydymosi temperatūra	913-933	K
Šiluminio laidumo koeficientas	140-160	$W/(mK)$
Jungo modulis	69,5	GPa
Poisono koeficientas	0,33	
Specifinė šiluma	899	$J(KgK)$

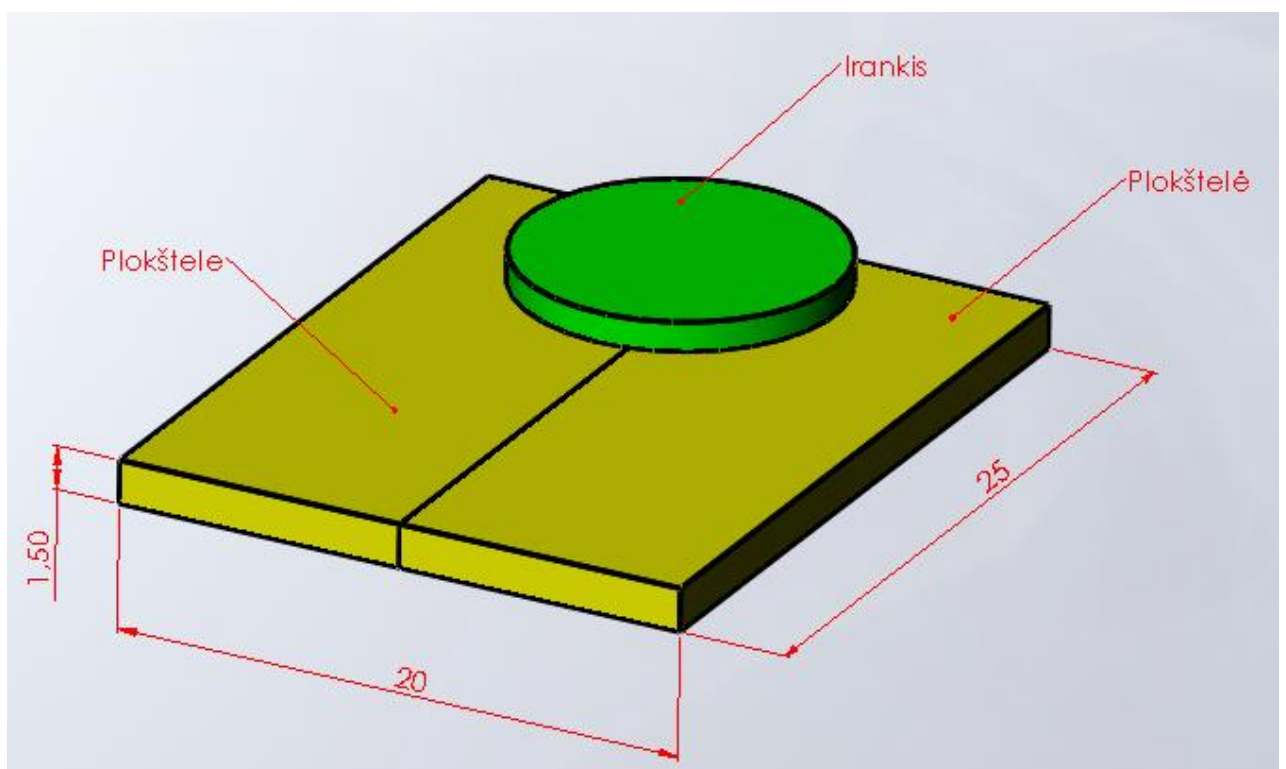
3.3 Skaičiavimo modelis

Frikinio virinimo proceso modelis aprašomas naudojantis jau rastomis medžiagos savybėmis, kurios pateiktos 3.1 ir 3.2 lentelėse. Suvirinimo įrankio medžiaga svarbios įtakos neturi, nes nuspręsta, kad įrankis nesideformuoja jo formą išlieka pastovi, nepakitusi. Ši prielaida daroma norint pagreitinti skaičiavimus, nes jie trunka ilgai.

Įrankio geometrija supaprastinama tam, kad supaprastinti tinklę, taipogi skaičiavimo pagreitinimui. Įrankio geometrija pateikiama (3.3 pav.).



3.1 pav. Įrankio geometrija ir matmenys.



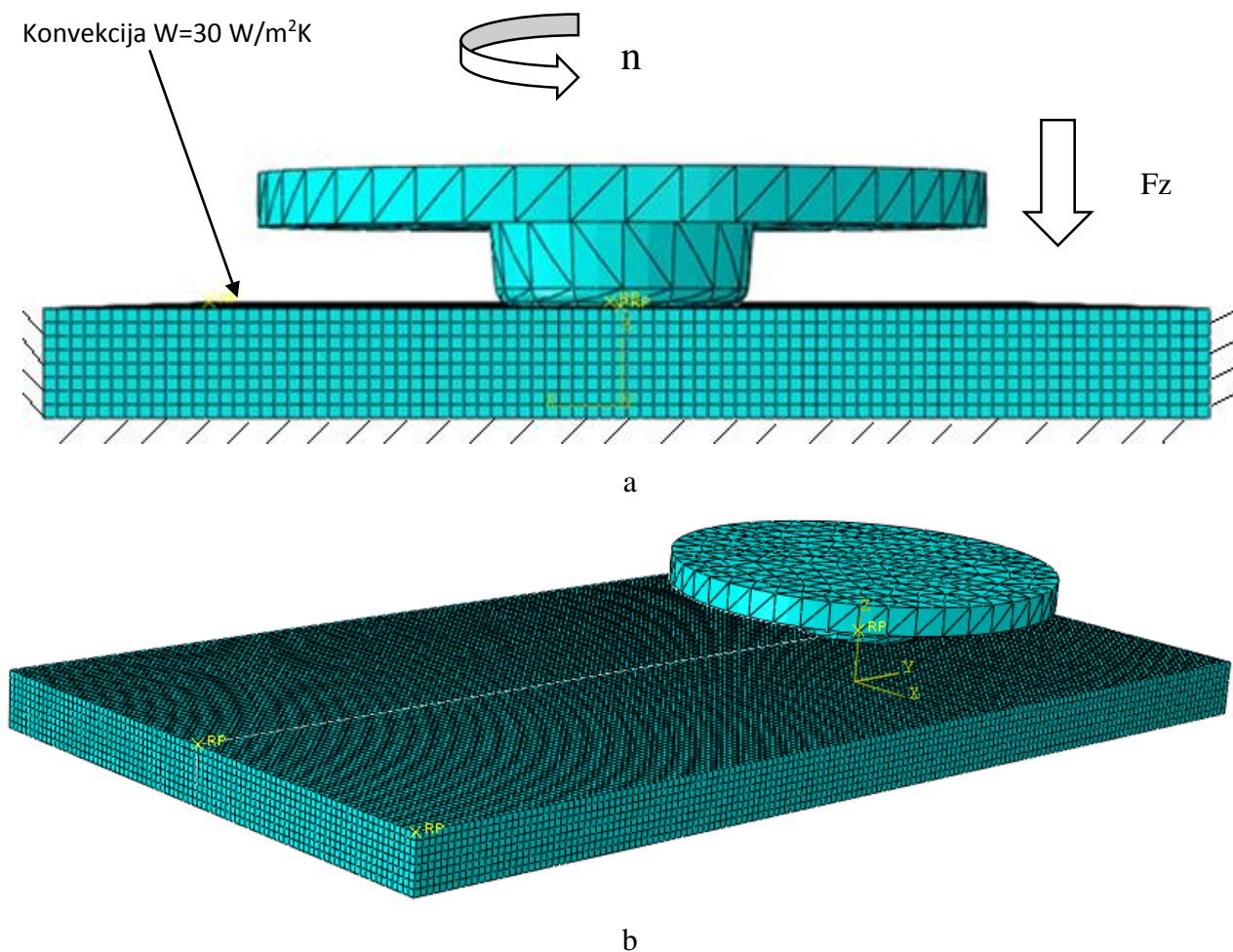
3.2 pav. Modelio erdvinis vaizdas.

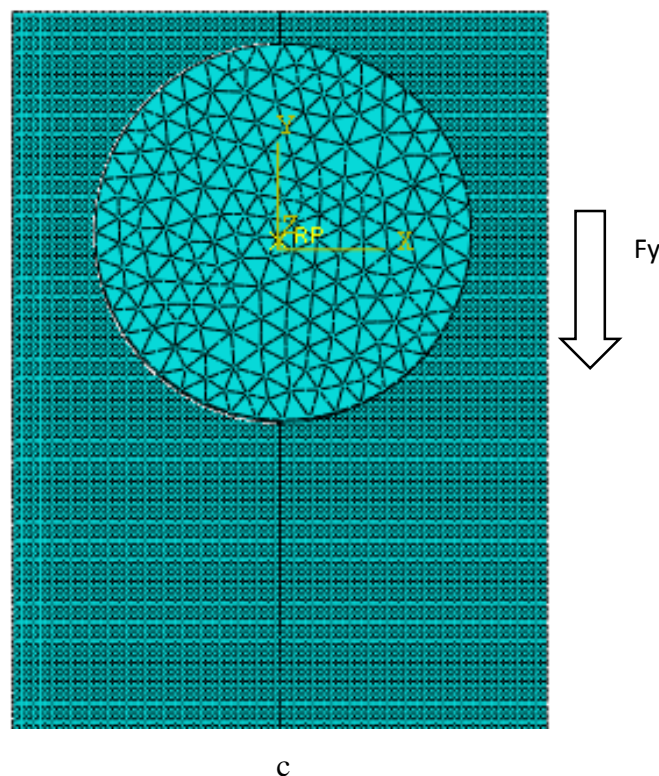
Virinimo modelio įrankis yra sumažintas tam, kad būtų sutaupomi resursai. Kaip buvo minėta ankstesnėje dalyje, įrankis visą virinimo procesą išlieka standus, jo konstrukcija nekinta. Įrankis sumažinamas iš tos pusės kur jis yra tvirtinamas į laikiklį. Įrankio geometrija supaprastinama vietoje 3×3 kvadrato, sumodeliuota $\varnothing 4$ apskritimas. Norint sumažinti netikslumus uždedamas $R 0,3$ mm. užapvalinimas ašelės dugne, viskas matosi (3.1 pav.). Likusieji įrankio matmenys parinkti nepakitę, išlikę tokie patys kaip realiu bandymu metu. Modeliavimo vaizdas praejus 1 s virinimo, vaizdas pateikiamas 3.2 pav.

Frikcinio virinimo modelyje parenkama tik dalis virinamos plokštelės tam, kad nereikėtų visos plokštelės skaidyti baigtiniais elementais. Parenkami plokštelės matmenys 10x25x1,5 mm. Plokštelės suglaudžiamos, įrankio padėtis parenkama tokia, kad išilgine ašimi judėtų 15 mm.

3D modelis (virinimo įrankis ir plokštelės) buvo sukurtas naudojantis Solidworks programa. Sukurtas modelis buvo importuotas į Abaqus darbo lauką.

Virinimo modelio vaizdas Abaqus programoje (3.3 pav.). Virinimo modeliui buvo suteiktas tinklelis (Mesh). Tinklelis paremtas baigtiniais elementais. Įrankiui buvo suteiktas tetraedrinis baigtiniu elementu (BE) tinklelis, kuris geriau gali atkartoti įrankio formą. Plokštelėms buvo suteikta heksaedrinis baigtinių elementų tinklelis. Šio tipo tinklelio modelis leidžia greičiau gauti rezultatus, rezultatai yra tikslesni. Sukūrus baigtinių elementų modelius, formas ir kraštinės sąlygos pateikiamos 3.3 lentelėje. Plokštelės suskaidomos taip, kad turėtų 8 sluoksnius per savo storį.





3.3 pav. Virinimo modelio vaizdas : a – vaizdas iš šono ir kraštinės sąlygos, b – erdvinis vaizdas, c – vaizdas iš viršaus ir judėjimas Y ašies atžvilgiu.

3.3 lentelė. Modelių baigtinių elementų duomenys.

Modelis	BE tipas	Elementų kiekis	Vidutinis kraštinės santykis
Įrankis	Teatraedras	63756	1,15
Kairė plokštelė	Heksaedras	55040	0,1875
Dešinė plokštelė	Heksaedras	55040	0,1875

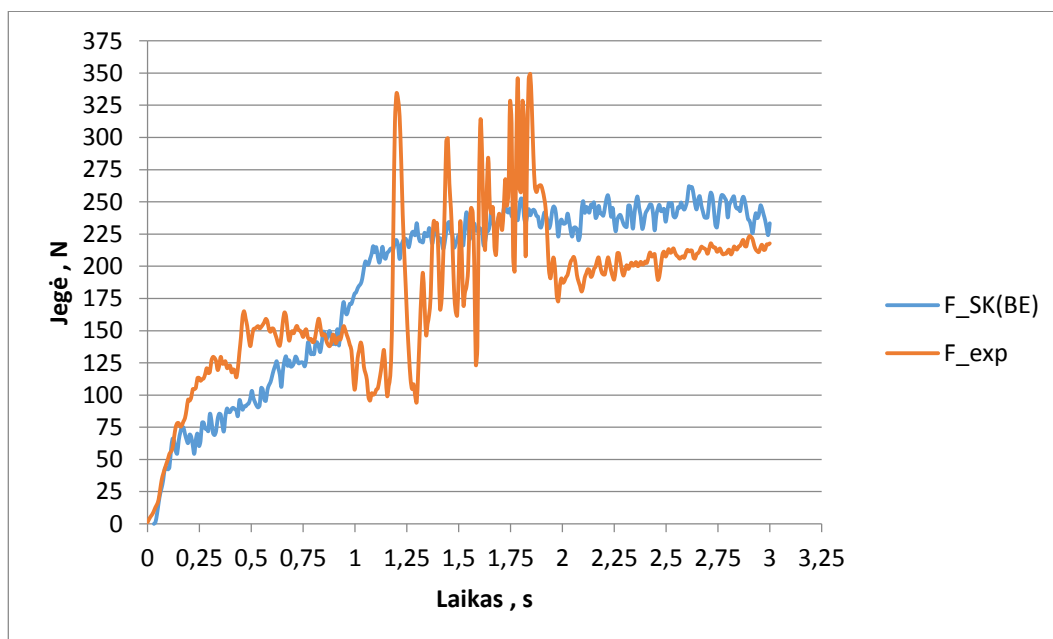
Frikinio virinimo modelis sukurtas naudojantis Dassault Systemes šeimos programoje Abaqus temperatūrinių poslinkio elementu. Skaičiuojant šiuo elementu įvertinami ir poslinkiai, ir temperatūros pokyčiai. Virinimo proceso metu svarbu įvertinti temperatūros įtaka virinimo procesui. Pasirenkamas C3D8RT elemento tipas.

Norint sumažinti skaičiavimo laiką deformacijoms, atsirandančioms įrankyje suvirinimo metu, buvo padaryta prielaida, kad įrankis nesideformuoja, todėl modeliavime įrankis padarytas „kietu“ kūnu (angl. *rigid body*). Plokštelių paviršiams nustatyta pradinė 293 K temperatūra ir 30 W/m²K konvekcija, trinties koeficientas 0,62. [29]. Plokštelės įtvirtinamos nejudamai. Įvertinama tai, kad po plokštelių yra kietas kūnas, kuris neleidžia plokštelėms linkti. Jų apatinis paviršius įtvirtinamas standžiai, suvaržomi visi galimi laisvės laipsniai (t. y. 6 laisvės laipsniai). Įrankiui suteikiamas sukimosi greitis, pastuma Z ašimi, gylis įrankio įsigilinimui ir pastuma Y ašimi.

Parametrai parenkami tokie pat kaip ir eksperimento metu F_z įsigilinimo pastuma, F_y pastuma virinimo metu ir įrankio sukimosi greitis n . Visi kiti laisvės laipsniai įrankiui yra suvaržyti.

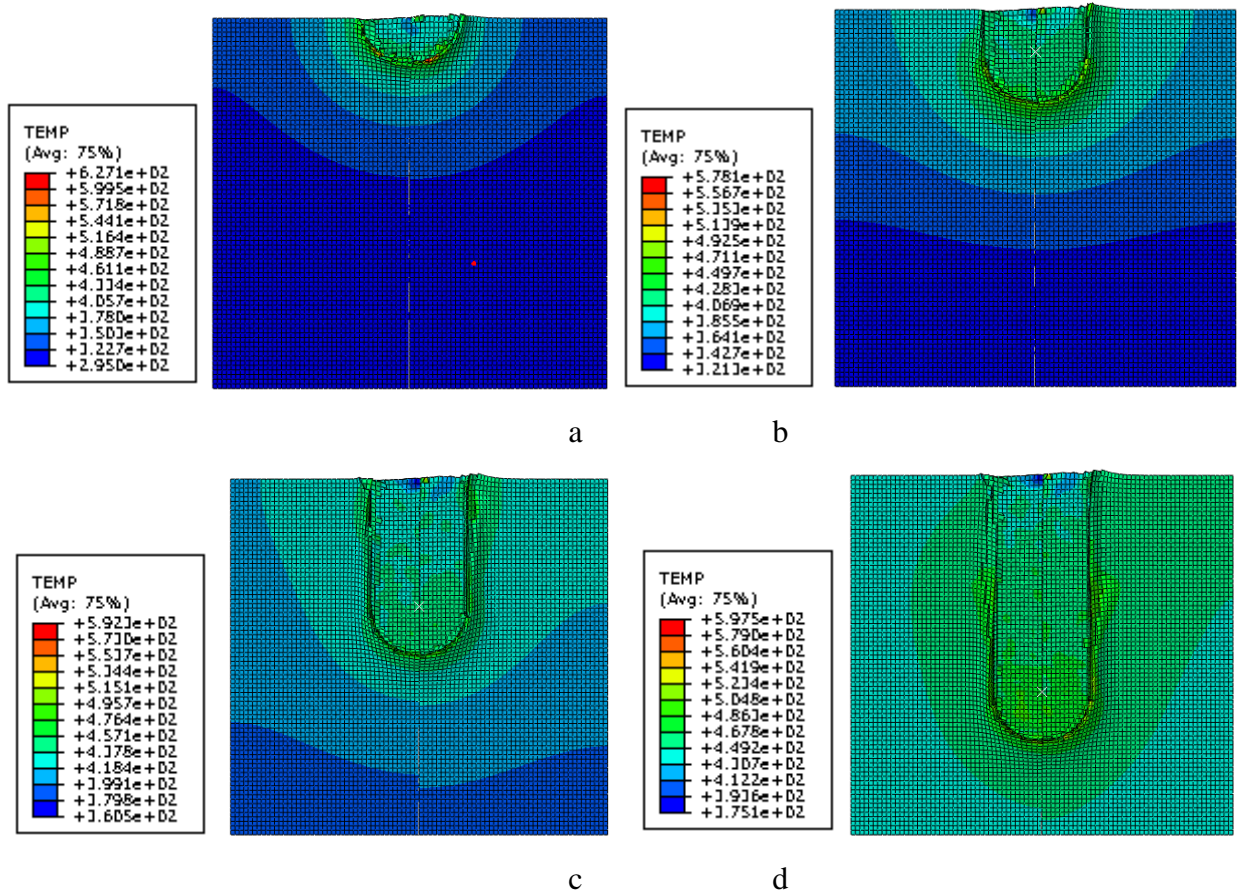
3.4 Modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Atlikus modeliavimo darbus, tai yra sukūrus baigtinių elementų modelį ir atlikus skaičiavimą, pastebėta, kad jėgos modeliavimo metu ir bandymo metu skirtumai minimalūs (3.4 pav.). Modeliavimo procesas buvo sutrumpintas iki 3 sekundžių tam, kad skaičiavimo procesas būtų trumpesnis. Grafike metu matyti jėgos kitimas nuo 0 s iki 1 s ir nuo 2 s iki 3 s yra labai artimas eksperimentiniams bandymams. Didžiausias skirtumas pastebimas nuo 1 s iki 2 s. Tai galima paaiškinti tuo, kad tada labiausiai pasireiškia kvadratinės ašelės įsigilinimas. Ašelės įsigilinimo metu jėgos stipriai kinta. Lyginant su modeliavimu įsigilinimas yra tolygus (kreivė kyla tiesiškai), tai galima paaiškinti tuo, kad modeliavimo metu įrankis buvo supaprastintas (3.1 pav.).

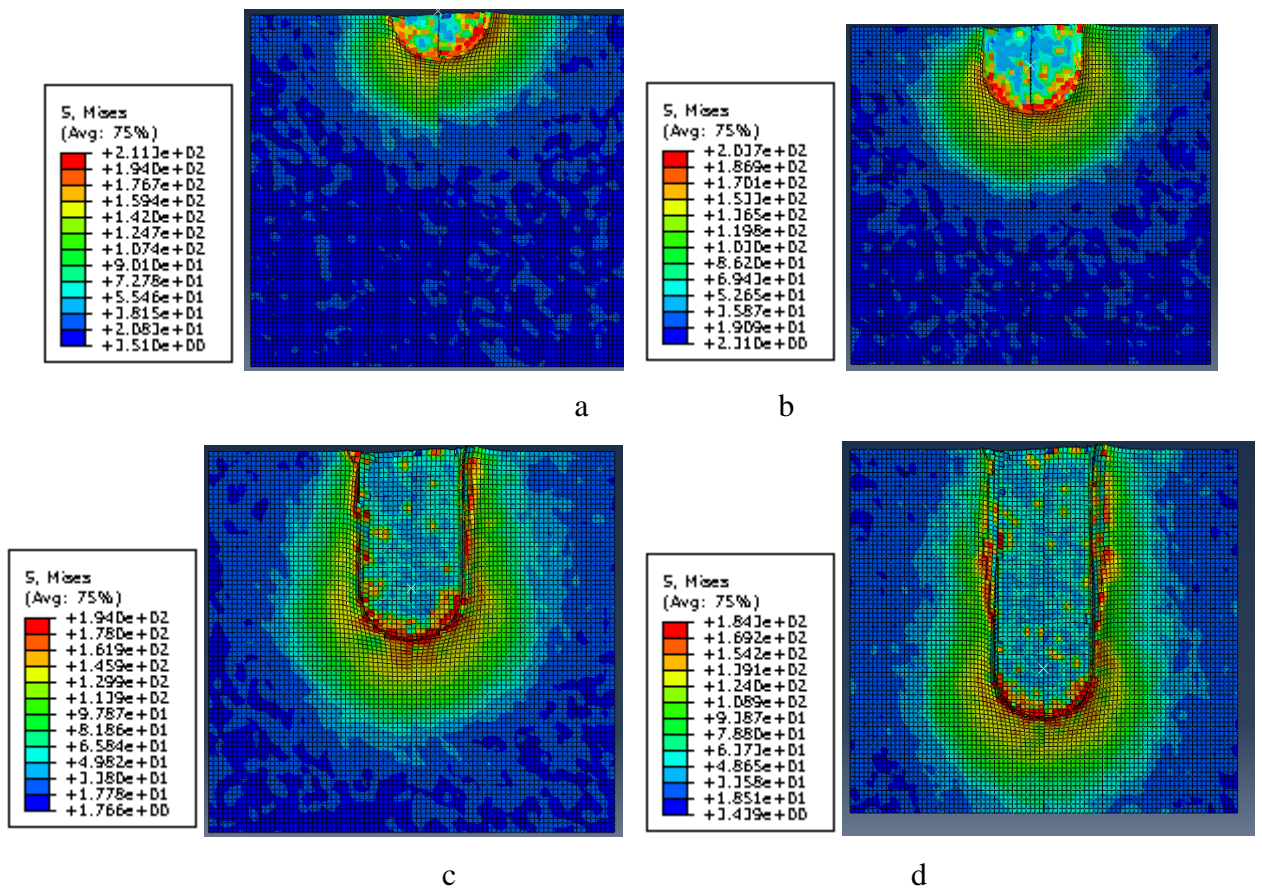


3.4 pav. Jėgų palyginimas esant : $n=3000$ aps/min, $F_y=300$ mm/min

Frikinio virinimo modeliavimo metu nustatytos temperatūrų kitimas pateikiamas (3.5 pav.), pateikiamos laike kintančios ekvivalentinės, Von Mises itempių reikšmės (3.6 pav.).

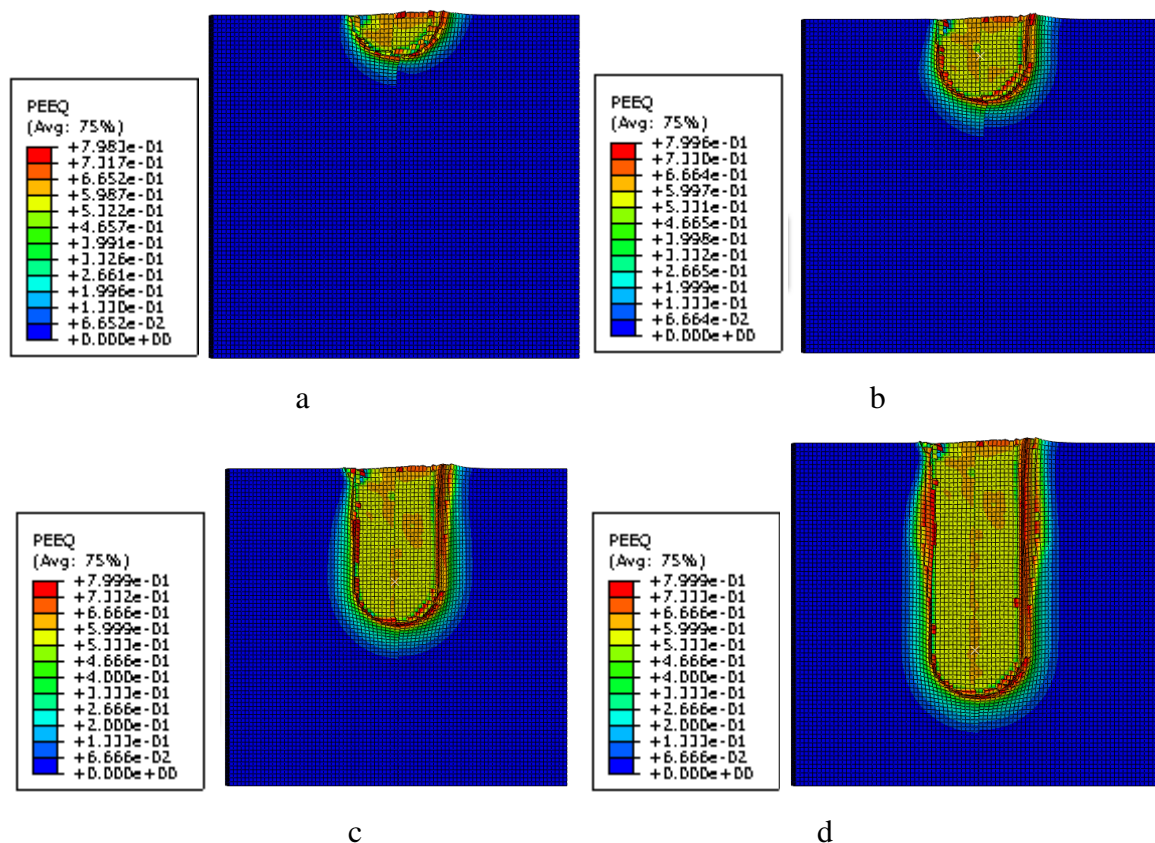


3.5 pav. Temperatūros kitimas laikė. : a – 0,5 s; b – 1 s; c – 2 s; d – 3 s.



3.6 pav. Ekvivalentiniai Von Mises įtempimų kitimai laikė : a – 0,5 s; b – 1 s; c – 2 s; d – 3 s.

Įtempių kitimas virinimo proceso metu rodo tai, kad ekvivalentiniai Von Mises įtempiai kinta laike (3.6 pav.). Tai galima paaiškinti tuo, kad išsiskirianti šiluma proceso metu sukuria naują medžiagos modeli, kuris apskaičiuojamas pagal 4 formulę, remiantis J. Cook modeliu. Virinimo proceso metu didėjanti šiluma išskiria didesnę temperatūrą, kuriai kylant mažėja takumo riba. Esant aukštai virinimo temperatūrai 597 K įtempiai siekia 184 MPa.



3.7 pav. Deformacijų kitimas laike: a – 0,5 s; b – 1 s; c – 2 s; d – 3 s.

Ekvivalentinių deformacijų laukų kitimas laike yra nežymus, t.y. kitimas beveik nevyksta. Tai yra dėl baigtinių elementu modelio aprašymo. Baigtinių elementų modelyje buvo nustatytos deformacijų ribos, jas viršijus programa automatiškai ištrina elementą. Nenaudojant minėtos sąlygos skaičiavimas neįvyktų dėl proceso metu susidarantių nesuskaičiuojamų baigtinių elementų deformacijų.

3.5 Frikinio virinimo modeliavimo išvados

Frikinio virinimo modeliavimo metu gautos jėgos ir eksperimentinio metu gautos jėgos sutampa keliuose laiko intervaluose – nuo 0 iki 1 ir , nuo 2 iki 3 sekundžių. Laiko tarpe, nuo 1 iki 2 sekundžių, paklaidos atsirandą dėl įrankio supaprastinimo modeliavimo metu. Eksperimentiniu bandymų įrankio ašelė yra 3x3 kvadratas, modeliavimo metu Ø4 apskritimas. Norint gauti didesnę modeliavimo tikslumą, reikia žinoti Al 10-50 medžiagos charakteristikas. Įvairių koeficientų priklausomybes nuo temperatūrų – tokiu kaip trinties priklausomybę nuo temperatūros, tankio, šiluminio laidumo koeficiento.

4 Išvados

Atlikus frikcinio virinimo literatūros analizę, eksperimentinius ir modeliavimo bandymus, suformuluojamos tokios išvados:

- Atlikus mokslinių straipsnių analizę pastebėta, kad dauguma tyrimu atlikti įrankio formos analizei ir suvirinimo siūlės kokybei nustatyti, kai keičiamas įrankio sukimosi greitis n ir skersinė pastuma F_y . Dauguma bandymų buvo atlikta su aliuminio ir vario lydiniais, todėl pasirinktos Lietuvos pramonėje plačiai naudojamos medžiagos, kurios buvo mažai tirtos užsienio literatūroje, t.y. Al 10-50 ir TL091T4 (AlMg5Mn).

- Atlikti eksperimentiniai suvirinimo bandymai su aliuminio lydiniai Al 10-50 ir TL091T4 (AlMg5Mn). Sudaryti eksperimentinių bandymų jėgų priklausomybių nuo laiko grafikai.

- Bandymo rezultatų sklaidos analizei įvertinti atlikta statistinė ANOVA metodo analizė. ANOVA tyrimas įrodė, kad didžiausią įtaką virinimui turi pastuma F_y , mažesnę įtaką įrankio sukimosi greitis n . Gauta statistinė lygtis $F_s = 2511.22 + 0.1082 \cdot n - 2.13 \cdot F_y$.

- Atlikus statistinę analizę galima teikti, kad norint sumažinti atsirandančias jėgas reikia didinti pastumą $F_y < 300$ mm/min ir mažinti įrankio apsisukimo greiti $n < 2000$ aps/min.

- Atlikti suvirinimo siūlės stiprumo tyrimai. Al 10 - 50 stipriausia siūlė gauta esant $n=2000$ aps/min, $F_y=300$ mm/min, tolygiausia siūlė suvirinta esant $n=4000$ aps/min ir $F_y=200$ ir 300 mm/min pastūmoms. TL091T4 (AlMg5Mn) aliuminio lydinio stipriausia siūlė gauta esant $n=3000$ aps/min ir $F_y=200$ mm/min pastūmai.

- Sukurtas BE modelis Abaqus programoje. Modeliavimo rezultatai rodo, kad modeliavimo metu gautos jėgos reikšmės geriausiai sutampą esant suvirinimo laikui nuo 0 s iki 1 s ir nuo 2 s iki 3 s.

5 Literatūra

1. **B.Liaudis**. Suvirinimo procesų teorija. Vilnius. Mokslas, 1987 , 131 psl.
2. Suvirinamos jungtis . [interaktyvus] [žiureta 2016-02-27] prieiga per internetą <http://stud.ppf.ktu.lt/vaiciulis/paskaitos/me1/me1-05.pdf>
3. **R.S. Mishraa, Z.Y. Ma** „Friction stir welding and processing“ Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78
4. The joint properties of copper by friction stir welding . [interaktyvus].[žiureta 2016-02-28] prieiga per internetą http://ac.els-cdn.com/S0167577X03006736/1-s2.0-S0167577X03006736-main.pdf?_tid=3cd0144c-07a4-11e5-8d4b-00000aacb360&acdnat=1433083948_9c9de4e77f61ff59eec0c7a423da84aa
5. Review of tools for friction stir welding and processing [interaktyvus] [žiureta 2016-03-01] Prieiga prie interneto <http://www.maneyonline.com/doi/pdfplus/10.1179/1879139512Y.0000000015>
6. Hitachi FSW staklių nuotrauką [interaktyvus] [žiureta 2016-04-01] Prieiga prie interneto <http://www.hitachi-power-solutions.com/en/products/product09/p043.html>
7. Esab FSW staklių nuotrauka [interaktyvus] [žiureta 2016-04-01] Prieiga prie interneto <http://www.esab.com/automation/en/products/FSW-programme.cfm>
8. FRICTION STIR WELDING [interaktyvus] [žiureta 2016-04-01] Prieiga prie interneto <http://www.a-star.edu.sg/simtech/Research/Research-Projects/tid/13/Friction-Stir-Welding.aspx>
9. **Akos Meilinger and Imre Torok** The importance of friction stir welding tool, Production Processes and Systems, vol. 6. (2013) No. 1.
10. **Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose and P. Wanjara**, Review of tools for friction stir welding and processing, Canadian Metallurgical Quarterly, (2012) VOL 51 NO 3
11. **R. Palanivel and P. Koshy Mathews**, Prediction and optimization of process parameter of friction stir welded AA5083 - H111 aluminum alloy using response surface methodology, J. Cent. South Univ. (2012) 19:
12. **Esther T. Akinlabi and Stephen A. Akinlabi**, Microstructural Characterizations of Dissimilar Friction Stir Welds, Proceedings of the World Congress on Engineering (2012) Volume III.
13. **L. Karthikeyan, M. Puviyarasan, S. Sharath Kumar and B. Balamugundan**, Experimental studies on friction stir welding of AA2011 and AA6063 aluminium alloys, International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.III/ Issue IV/Oct.-Dec. (2012) 144-145.
14. **P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella, A. Squillace** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082–AA2024 joints produced by

friction stir welding, *Materials and Design* 30 (2009) 609–616.

15. **W H Jiang and R Kovacevic**, Feasibility study of friction stir welding of 6061-T6 Aluminium alloy with AISI 1018 steel, *Proc. Institution of Mechanical Engineers, J. Engineering Manufacture* (1999) Vol. 218 Part B.
16. **K. Kumar, S. V. Kailas and T. S. Srivatsan**: Influence of tool geometry in friction stir welding', *Mater. Manuf. Process.*, 2008
17. **N. A. Rodriguez, E. Almanza, C. J. Alvarez and L. E. Murr** Study of friction stir welded A319 and A413 aluminum casting alloys *J. Mater. Sci.*, 2005,
18. **P. A. Colegrove and H. R. Shercliff** Development of Trivex friction stir welding tool Part 1 – two-dimensional flow modelling and experimental validation', *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2004
19. **H. Fujii, L. Cui, M. Maeda and K. Nogi** Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys , *Mater. Sci. Eng. A*, 2006
20. **C. D. Sorensen and A. L. Stahl** 'Experimental measurements of load distributions on friction stir weld pin tools', *Metall. Mater. Trans. B*, 2007
21. **O. Lorrain, V. Favier, H. Zahrouni and D. Lawrjaniec** 'Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools', *J. Mater. Process. Technol.*, 2010
22. **S. M. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole and X. Cao** Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch , *Mater. Sci. Eng. A*, 2010,
23. **P. Kah, E. Hiltunen, J. Martikainen, J. Katajisto**: „Experimental investigation of welding of aluminum alloys profiles and wrought plate by FSW. *Mechanika*, 2009
24. **Jeroen De Backer, Bert Verheyden** *Robotic Friction Stir Welding for Automotive and Aviation Applications*. 2009
25. Al 10-50 charakteristikos prieiga prie interneto. Iš „Alumengruop“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016-01-10]. http://www.alumengroup.com/pdf/alloys_spec.pdf
26. AlMg5Mn charakteristikos prieiga prie interneto. Iš „Welding alloys“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016-01-10] <http://www.welding-alloys.com/products-services/wa-welding-consumables/aluminium-welding-wires/speedal-5556a-almg5mn.html> Welding alloys“
27. **Instron E 1000 informacija**. Iš „Instron“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016-01-11] prieiga prie interneto <http://www.instron.com/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/electropuls/e1000>
28. **Biswajit Parida, Sukhomay Pal, Pankaj Biswas, M M Mohapatra** Sujoy Tikader „Mechanical and Micro-structural Study of Friction Stir Welding of Al-alloy

29. **P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačenga.** Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process. *MECHANIKA*. Volume 20(6), 2014, p. 590-595
30. Straipsnis „Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016-01-11] prieiga prie interneto <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X12002035>
31. Modifications in the AA5083 Johnson-Cook Material Model for Use in Friction Stir Welding Computational Analyses M. Grujicic, B. Pandurangan, C.-F. Yen, and B.A. Cheeseman
32. **L. Commin, M. Dumont , J.-E. Masse , L. Barrallier** Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters. *Acta Materialia* 57 (2009) 326–334

Priedas 1

FSW virinimo programa Leadwell staklėms :

%

O0034 (SUVIRINIMAS) ;“ programos vardas“

M3 S3000; “ apsisukimai 3000”

G94 G91 G0 Z-10 ; “ greitąja pastuma Z kryptimi žemyn 10 mm“

G01 Z-1.3 F40; „ letąja pastuma Z žemyn 1,3 mm“

G04 P2000 : „

G01 Y85 F300 ; „ letoji pastuma y važiuoti 85 mm, 300 mm/min pastuma“

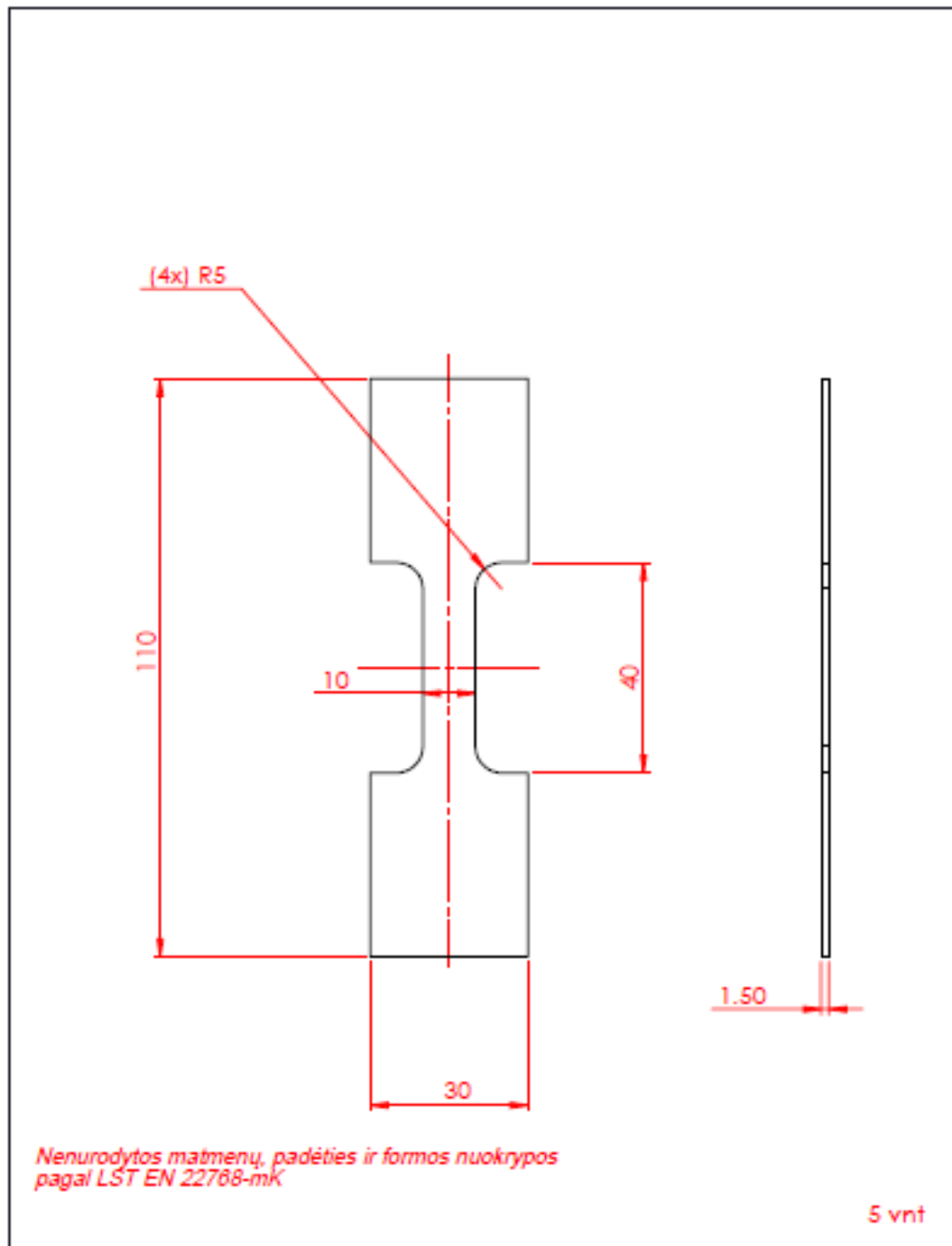
G0 0 Z11.3 ; „ greitoji pastuma Z 11,3 i virsu. „

G0 Y-85 ; „ greitoji patuma Y 85 mm i pradini taška.

M30 ; “ programos pabaiga“

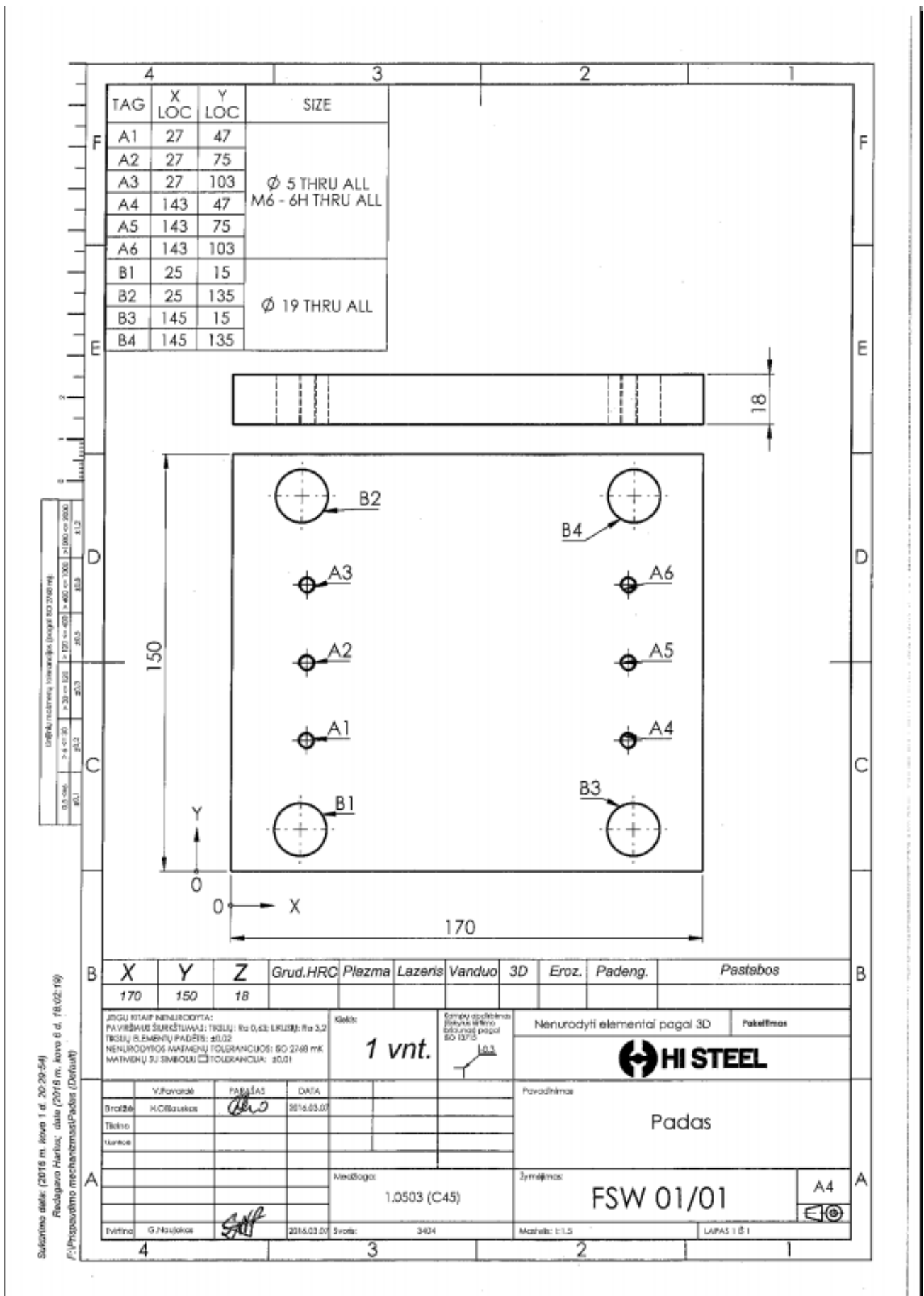
%

Priedas 2



	<i>Bylė, pavadinimas</i>	<i>Papildoma informacija</i>	<i>Medžiaga</i> <i>Aluminio lakštas t=1 mm</i>	<i>Mastelis</i> <i>M 1:1</i>
<i>Atbakinga žinyba</i> <i>IPK</i>	<i>Vedovas</i>	<i>Dokumento tipas</i> <i>Detalės brėžinys</i>	<i>Dokumento statusas</i> <i>Mokomasis</i>	
<i>Savininkas</i> <i>KTU</i>	<i>Ringė</i> <i>H. Olišauskas</i>	<i>Antrešė</i> <i>Bandinys tempimui</i>	<i>Žymuo</i>	
	<i>Tvirtino</i> <i>R. Česnavičius</i>		<i>Laida</i> <i>A</i>	<i>Data</i> <i>27/04/2016</i>
			<i>Kaibe</i> <i>IL</i>	<i>Lapas</i> <i>1/1</i>

Priedas 3



Priedas 5

	4	3	2	1					
	Nr.	Kiekis	Pavadinimas	Žymėjimas	x	Y	Z	Medžiaga	
F	1	1	Padas	FSW 01/01	170	150	18	1.0503 (C45)	F
	2	2	Atrama 1	FSW 01/02	50	80	18	1.0503 (C45)	

L1004 matmenų tolerancijos (pagal ISO 286 m3)

0,5 cm	±0,1
> 0,5 cm - 30	±0,2
> 30 cm - 120	±0,3
> 120 cm - 400	±0,5
> 400 cm - 1000	±0,8
> 1000 cm - 2000	±1,2

X	Y	Z	Grūd.HRC	Plazma	Lazeris	Vanduo	3D	Eroz.	Padeng.	Pastabos
170	150	36								

JEIGŲ KITAP NENURODYTA: PAVIRŠIAUS ŠIURŠTUMAS: IK3,5; Ra 0,63; UR3,5; Ra 3,2 TIESLŲ ELEMENTŲ PADĖS: H0,02 NENURODYTOS MATMENŲ TOLERANCIJOS: ISO 2768 mK MATMENŲ SU SVARBU: TOLERANCIJA: ±0,01	Kiekis: 1 vnt.	Kompi. apdėklas (išvyst. ūrimo šaltumai) pagal ISO 13715 -0,3
V.Pavardė: PARAŠAS DATA: 2016.05.17		Nenurodyti elementai pagal 3D Pakeitimai
Braižė: H.Obauckas		HI STEEL
Pavadinimas: Surinikimas		FSW 01/SB
Medžiaga:		A4 ☐
Tvirtina: G.Naujikas DATA: 2016.05.17 Svoris: 4146,94		Mastelis: 1:1,5 LAPAS 1 iš 1

Sukūrimo data: (2016 m. kovo 1 d. 21:23:29)
 Redaguota naujais: data (2016 m. gegužės 17 d. 08:16:49)
 P/Įspėjimo mechanizmas (Surinikimas) (Default)