



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Darius Jonaitis**  
Projekto autorius

**Doc. Ramūnas Česnavičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

**Darius Jonaitis**  
Projekto autorius

**Doc. Ramūnas Česnavičius**  
Vadovas

**Lekt. dr. Anatolijus Šulginas**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Darius Jonaitis

## **Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Dariaus Jonaičio, baigiamasis projektas tema „Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – MECHANIKOS INŽINERIJA 6211EX009

## **Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis**

**Studentui(-ei)** – Darius Jonaitis

### **1. Baigiamojo projekto tema –**

Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių tyrimas

---

*(Lietuvių kalba)*

Investigation of seam parameters for plastic materials friction stir welding

---

*(Anglų kalba)*

### **2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –**

Tikslas – atlikti frikcinį maišymo suvirinimą siūle pasirinktiems plastikams ir ištirti gautų jungčių stiprumą.

**Uždaviniai:**

- atlikti plastikų suvirinimo procesų ir jų taikymo pramonėje literatūros analizę, bei įvardinti frikcinio maišymo suvirinimo proceso pranašumus;
- atlikti eksperimentinius frikcinio maišymo suvirinimo proceso bandymus, keičiant suvirinimo parametrus;
- atlikti suvirintos jungties stiprumo bandymą, rezultatus palyginti su nesuvirintu plastikumu;
- atlikti skaitinį ABS plastiko plokštelių suvirinimo proceso modeliavimą ir rasti, kaip suvirinimo parametrai veikia temperatūros ir įtempių pasiskirstymą ABS plastiko plokštelėse;
- atlikti statistinį suvirinimo parametrų įtakos suvirinimo siūlės stiprumui tyrimą, naudojant „Minitab“ statistinę programinę įrangą.

### 3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Projekte naudojant ABS, PP ir PE plastikus, ištirti frikcinio maišymo suvirinimo siūlės stiprumą, keičiant suvirinimo parametrus.

### 4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Tyrimo objektas – plastiko ABS (akrilnitrilo butadieno stireno polimeras), PP (polipropilenas) ir PE (polietilenas) plokštelės, kurių matmenys 100x50x2 mm. Plokšteles suvirinti tarpusavyje frikciniu maišymo būdu, naudojant „Leadwell V-20“ CNC stakles. Patikrinti gautos jungties stiprumą tempimo bandymo mašina „Tinius Olsen H10KT“.

Projekto autorius

Darius Jonaitis

\_\_\_\_\_  
(Vardas, Pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

\_\_\_\_\_  
(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Doc. Ramūnas Česnavičius

\_\_\_\_\_  
(Vardas, Pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

\_\_\_\_\_  
(data)

Krypties studijų programos vadovas

Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

\_\_\_\_\_  
(Vardas, Pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

\_\_\_\_\_  
(data)

Jonaitis, Darius. Plastikų suvirintų frikciniu maišymo būdu siūlės savybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas doc. Ramūnas Česnavičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijų mokslai, mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: *suvinimas, plastikas, frikcinis, suvirinimo siūlė, tyrimas.*

Kaunas, 2020. 60 p.

## **Santrauka**

Baigiamajme magistro darbe nagrinėjamas plastikinių detalių frikcinio maišymo suvirinimo procesas. Darbe pateikiamos priežastys, kurios nulemia frikcinio suvirinimo kokybę ir patvarumą. Taip pat aptariami plastikinių detalių suvirinimo būdai, jų privalumai ir trūkumai. Didesnis dėmesys skiriamas frikcinio maišymo suvirinimo procesui. Aptariama, kokie plastikai tinkami suvirinimo procesui.

Norint iširti frikcinio maišymo suvirinimo siūlės stiprumą, eksperimentiškai buvo atlikti bandymai su ABS (akrilnitrilo butadieno stireno polimero), PP (polipropileno) ir PE (polietileno) plastiko plokštelėmis. Baigiamojo projekto tikslas, buvo iširti plastikų frikcinio suvirinimo ypatumus, bandant suvirinti plastikus tarpusavyje. Bandymai buvo atlikti keičiant plastiko plokšteles, taip pat keičiant įrankio sukimosi dažnį ir suvirinimo pastumą. Patikrintas gautų suvirinimo siūlių stiprumas tempimo bandymo mašina.

Modeliavimo dalyje atliktas frikcinio maišymo suvirinimo proceso imitavimas, „Abaqus Unified – Simula“ kompiuterine programa. Buvo gauti plastiko plokštelių įtempimų ir temperatūrų pasiskirstymo rezultatai.

Naudojant „Minitab“ statistinę programinę įrangą buvo įvertinta suvirinimo parametrų įtaka suvirinimo siūlės stiprumui.

Ši baigiamąjį darbą sudaro: Įvadinė dalis; Literatūros apžvalga; Eksperimentinė dalis; Modeliavimo dalis; Statistinė analizė; Išvados; Literatūros sąrašas.

Jonaitis, Darius. Investigation of seam parameters for plastic materials friction stir welding. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Ramūnas Česnavičius; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study are, study field: Tehcnological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: *welding, plastic, polymers, seam.*

Kaunas, 2020. 60 p.

### **Summary**

The aim of this masters final work is to investigate friction stir welding of polymeric materials. The paper presents the main reasons that determine the quality and durability of friction stir welding. Welding methods of plastic parts, their advantages and disadvantages are also discussed. The structure of plastics is discussed, as well as which plastics are suitable for the welding process.

To find out experiments were performed with ABS (Acrylonitrile butadiene styrene), PP (Polypropylene) and PE (Polyethylene) plastic plates. The tests were performed by changing the plastic plates as well as changing key parameters: rotational speed and feed rate. The strength of the welds obtained was checked by a tensile testing machine.

In the modeling part, the simulation of friction stir welding was designed with the program „Abaqus Unifed – Simula“. The obtained results are the stress and temperature distribution of plastic plates.

Using „Minitab“ statistical software, the influence of welding parameters on the proposed welding strength was checked.

This final work is splitted to five themes: Analysis of literature; Experimental part; Part of modeling; Conclusions; References.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	9
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	10
<b>ĮVADAS</b> .....	12
<b>1.Literatūros apžvalga</b> .....	13
1.2.Pagrindiniai suvirinimo žingsniai .....	14
1.3.Suvirinimo metodų klasifikavimas .....	15
1.3.1.Ultragarsinis plastiko suvirinimas .....	15
1.3.1.1 Ultragarsinio suvirinimo taikymas .....	16
1.3.2 Vibracinis plastiko suvirinimas .....	16
1.3.2.1 Vibracinio suvirinimo taikymas .....	17
1.3.3 Frikcinis maišymo suvirinimas.....	17
1.3.3.1 Frikcinio maišymo suvirinimo taikymas .....	19
1.3.4 Indukcinis plastiko suvirinimas .....	19
1.4. Įrankių tipai naudojami frikciniam maišymo suvirinime .....	20
1.5 Taškinis ir siūlinis suvirinimas .....	21
1.6 Suvirinimo defektai, atsiradimo priežastys .....	21
1.7 Polimerai.....	22
1.8 Užsienio mokslininkų bandymų rezultatai .....	23
1.9 Literatūros apibendrinimas .....	24
<b>2. Eksperimentinė dalis</b> .....	26
2.1 Eksperimento eiga .....	26
2.2 Naudota įranga.....	27
2.3 Frikcinio maišymo suvirinimo procesas .....	29
2.5 Rezultatai .....	31
2.5.1 PP plastiko rezultatai .....	33
2.5.2 PE plastiko rezultatai .....	34
2.5.3 ABS plastiko rezultatai .....	35
2.6 Išvados .....	37
<b>3. Modeliavimo procesas</b> .....	39
3.1Modeliavimo procesas .....	39
3.2Rezultatai .....	44
3.2.1Temperatūrų pasiskirstymas plokštelėse .....	44
3.2.2 Įtempių pasiskirstymas plokštelėse .....	47
3.2.3 Išvados .....	49
<b>4. Statistinė analizė (ANOVA)</b> .....	51
<b>Išvados</b> .....	55
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	57
<b>Priedai</b> .....	59



## Lentelių sąrašas

<b>1.1 lentelė.</b> Ultragarinio suvirinimo privalumai ir trukūmai .....	16
<b>1.2 lentelė.</b> Vibracinio suvirinimo privalumai ir trukūmai .....	16
<b>1.3 lentelė.</b> Frikcinio suvirinimo privalumai ir trukūmai .....	19
<b>1.4 lentelė.</b> Indukcinio suvirinimo privalumai ir trukūmai .....	20
<b>1.5 lentelė.</b> Polimerų tempimo stiprumas.....	22
<b>2.1 lentelė.</b> PE plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka .....	26
<b>2.2 lentelė.</b> PP plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka .....	26
<b>2.3 lentelė.</b> ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka.....	27
<b>2.4 lentelė.</b> CNC staklių „Leadwell V-20“ pagrindinės charakteristikos .....	27
<b>2.5 lentelė.</b> „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašinos pagrindinės charakteristikos .....	29
<b>2.6 lentelė.</b> PP plastiko tempimo bandymo rezultatai .....	32
<b>2.7 lentelė.</b> PE plastiko tempimo bandymo rezultatai.....	33
<b>2.8 lentelė.</b> ABS plastiko tempimo bandymo rezultatai.....	33
<b>2.9 lentelė.</b> Frikciniu maišymo būdu suvirintos PP plastiko siūlės palyginimas su sveika nesuvirinta medžiaga.....	34
<b>2.10 lentelė.</b> PE plastiko tempimo bandymo rezultatai.....	35
<b>2.11 lentelė.</b> Frikciniu maišymo būdu suvirintos ABS plastiko siūlės palyginimas su sveika nesuvirinta medžiaga.....	37
<b>3.1 lentelė.</b> ABS plastiko parametrai ir Johnson-Cook parametrai.....	41
<b>3.2 lentelė.</b> Iš plieno pagaminto įrankio parametrai ir Johnson-Cook parametrai .....	41
<b>3.3 lentelė.</b> Modeliavimo pagrindiniai parametrai ir seka. ....	42
<b>3.4 lentelė.</b> ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo temperatūrų rezultatai.....	46
<b>3.5 lentelė.</b> ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo įtempių rezultatai.....	49
<b>4.1 lentelė.</b> ABS plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai.....	51
<b>4.2 lentelė.</b> PE plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai .....	52
<b>4.3 lentelė.</b> PP plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai .....	52

## Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Plastiko sujungimo būdai [2].....	13
1.2 pav. Suvirinimo metodai [3] .....	15
1.3 pav. Ultragarsinis aparatas [3] .....	15
1.4 pav. Detalių judėjimas vibraciniame suvirinime [3].....	16
1.5 pav. Prietaisų skydelių surinkimas [4] .....	17
1.6 pav. Frikinis suvirinimas [5] .....	18
1.7 pav. Pagrindiniai veiksniai darantys įtaką plastikų frikinio maišymo suvirinimo kokybei [?].....	18
1.8 pav. Indukcinis suvirinimas [8].....	19
1.9 pav. Įrankio „Pin“ ir „Shoulder“ dalys [7].....	20
1.10 pav. Ašelės „Pin“ formų pasirinkimas[7] .....	20
1.11 pav. ABS ir akrilo suvirinimo bandymai; (WT-suvirinimo laikas (s); WP-slėgis (bar) ; TS- gautas suvirinimo siūlės stiprumas (Mpa)) [11] .....	23
1.12 pav. Gautas grafikas. Suvirinimo siūlės stiprumas priklausomai nuo slėgio ultragarsinio suvirinimo metu. Suvirinimo laikas 2,5 sek. [11].....	23
1.13 pav. PE plastiko frikinio suvirinimo pasirinkti parametrai [12].....	24
1.14 pav. PE plastiko frikinio suvirinimo metu gautos siūlės stiprumas [12].....	24
2.1 pav. CNC staklės „Leadwell V-20“ ir staklių valdymo blokas.....	28
2.2 pav. „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašina.....	29
2.3 pav. Įrankis naudojamas plastiko frikinio maišymo suvirinimui (brėžinys žr. 2 priedą).....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
2.4 pav. Plokštelių įtvirtinimas laikiklyje .....	29
2.5 pav. PE plastiko frikcinio maišymo suvirinimo bandymas.....	30
2.6 pav. Frikinio maišymo būdu suvirintos plokštelės (kairėje pusėje ABS plastikas, dešinėje PE).....	30
2.7 pav. „QMAT Materials Testing & Analysis Software“ pagalba gaunami jėgos – pailgėjimo priklausomybės kreivė.....	31
2.8 pav. ABS plastiko tempimo diagrama. Įtempių-deformacijos kreivė.....	31
2.9 pav. ABS plastiko tempimo diagrama. Įtempių-deformacijos kreivė.....	32
2.10 pav. PP plastiko suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio.....	34
2.11 pav. PE plastiko suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio.....	35
2.12 pav. ABS plastiko suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio.....	36
2.13 pav. ABS plastiko suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybė nuo įrankio apsisukimų greičio .....	36
3.1 pav. Modelio schema.....	40
3.2 pav. Naudojamas sumodeliuotas įrankis ir jo matmenys .....	40
3.3 pav. ABS plastiko plokštelės, kurių kiekvienos matmenys 100x50x2 mm .....	40
3.4 pav. Sudarytas junginys. Plastiko plokštelės įtvirtinamos šonuose .....	42
3.5 pav. Įvedamos kraštinės sąlygos. Įrankio judėjimo greitis ir įrankio sukimosi greitis .....	43
3.6 pav. Tinklelio dydžio pasirinkimas .....	43
3.7 pav. Junginys su sudarytu baigtinių elementų tinkleliu .....	44
3.8 pav. Frikinio suvirinimo pirmo bandymo temperatūrų pasiskirstymas ABS plastiko plokštelėse (°C), paveikslėlyje pavaizduota temperatūra 5 suvirinimo sekunde .....	45

<b>3.9 pav.</b> Frikcinio maišymo suvirinimo temperatūros (°C) pasiskirstymas ABS plokštelėje. Rezultatam pavaizduoti buvo pasitelktas išilginis pjūvis plokštelėje.....	45
<b>3.10 pav.</b> Atlikus išilginį pjūvį, pasirenkamas trečias elementas nuo suvirinimo pradžios taško .....	46
<b>3.11 pav.</b> Pasirinkto elemento temperatūros (°C) kitimo grafikas per pirmas 25 suvirinimo sekundes.	46
<b>3.12 pav.</b> ABS plastiko, modeliavimo metu gautos temperatūrų, nuo suvirinimo parametru pasiskirstymas.....	47
<b>3.13 pav.</b> Frikcinio maišymo suvirinimo pirmo bandymo “von mises” įtempių pasiskirstymas ABS plastiko plokštelėse, paveikslėlyje pavaizduotas įtempių pasiskirstymas 5 suvirinimo sekundę.....	48
<b>3.14 pav.</b> Frikcinio maišymo suvirinimo įtempių pasiskirstymas ABS plokštelėje. Rezultatam pavaizduoti buvo pasitelktas išilginis pjūvis plokštelėje.....	48
<b>3.15 pav.</b> Pasirinkto elemento “von mises” įtempių kitimo grafikas per pirmas 25 suvirinimo sekundes .....	48
<b>4.1 pav.</b> ABS plastiko frikcinio maišymo parametru svarba, suvirinimo siūlės stiprumui.....	51
<b>4.2 pav.</b> PE plastiko frikcinio maišymo parametru svarba, suvirinimo siūlės stiprumui.....	52
<b>4.3 pav.</b> ABS plastiko frikcinio maišymo parametru svarba, suvirinimo siūlės stiprumui.....	53
<b>4.4 pav.</b> PP plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas.....	53
<b>4.5 pav.</b> PE plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas.....	54
<b>4.6 pav.</b> ABS plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas.....	54

## ĮVADAS

Suvirinimo istorijos pradžia laikomas Bronzos amžius, kai senovės egiptiečiai savo geležinius įrankius gamindavo suvirinimo būdu. Šis amatas labiausiai išpopuliarėjo viduramžiais. XIX a. mokslininkui A. D. Meritenui (*Auguste de Méritens*) pavyko išlydyti švino plokšteles naudojant elektros lanko šilumą. Vėliau atsirado ir kitų suvirinimo būdų: taškinis suvirinimas, elektrinis taškinis suvirinimas ir kt. XXI a. šis procesas tapo neatsiejama gamybos dalimi, smarkiai patobulėjo suvirinimo įrankiai.

Dažniausiai suvirinimo procesas taikomas dviems metalams tarpusavyje sujungti, pavyzdžiui, norint sujungti įvairius aliuminio lydinius, lydinius su variu, geležimi. Tačiau taip pat suvirinimas plačiai naudojamas ir tarpusavyje sujungiant plastikus. Plastiką – viena iš dažniausiai naudojamų medžiagų visame pasaulyje, kuris nenusileidžia savo stiprumu ir ilgaamžiškumu kitoms medžiagoms. Iš plastiko gamini įvairūs daiktai: maisto pakuotės, žaislai, taip pat plastikas naudojamas statybos, automobilių pramonėje ir daugelyje kitų sričių. Prieš sujungiant plastikus tarpusavyje, reikia išanalizuoti įvairius suvirinimo būdus, įvertinti kurie plastikai tarpusavyje gali būti suvirinti, o kurie – ne, nes nuo to priklauso gaminio kokybė ir saugus produkto naudojimas.

Frikcinis maišymo suvirinimas buvo pristatytas 1991 metais ir tapo priimtiniu sujungimo procesu. Tuo tarpu polimerų sujungimas taikant šį būdą yra pradinėje stadijoje. Mažai žinoma apie plastikų suvirinimo procesą ir kaip pasikeičia virinamos medžiagos mikrostruktūra. Iš visų, rinkoje esančių polimerų, ištirtas tik keliolikos polimerų sujungimo, frikcinio maišymo būdu, technologijos efektyvumas.

**Projekto tikslas** – atlikti frikcinį maišymo suvirinimą siūle pasirinktiems plastikams ir ištirti gautų jungčių stiprumą.

**Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:**

1. atlikti plastikų suvirinimo procesų ir jų taikymo pramonėje literatūros analizę, bei įvardinti frikcinio maišymo suvirinimo proceso pranašumus;
2. atlikti eksperimentinius frikcinio maišymo suvirinimo proceso bandymus, keičiant suvirinimo parametrus;
3. atlikti suvirintos jungties stiprumo bandymą, rezultatus palyginti su nesuvirintu plastikų;
4. atlikti skaitinį ABS plastiko plokštelių suvirinimo proceso modeliavimą ir rasti, kaip suvirinimo parametrai veikia temperatūros ir įtempių pasiskirstymą ABS plastiko plokštelėse;
5. atlikti statistinį suvirinimo parametrų įtakos suvirinimo siūlės stiprumui tyrimą, naudojant „*Minitab*“ statistinę programinę įrangą.

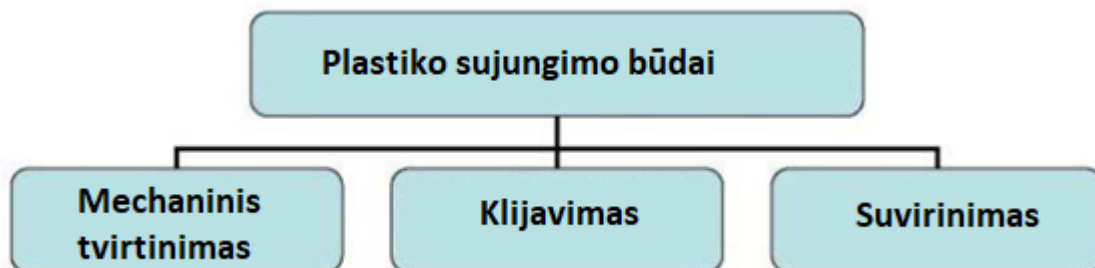
## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Plastiko jungimo būdai

Plastikas – tai polimerinė medžiaga, naudojama įvairiose pramonės šakose. Iš jo gaminami elementarūs daiktai: pakuotės, žaislai, taip pat sudėtingos plastikinės detalės, pavyzdžiui, plastikiniai širdies vožtuvai medicinos pramonėje. Plastikai turi daug privalumų: gerą paviršiaus kokybę, gerą stiprumo ir svorio santykį, konstrukcijos lankstumą, korozijos nebuvimą, atsparumą gamtos veiksniams, šiluminę ir elektros izoliaciją.

Šiuo metu rinkoje yra tūkstančiai polimerų. Jie pasižymi įvairiomis savybėmis – minkštumu, kietumu, kalumu, trapumu, taip pat plastikai gali būti skirstomi į silpnus ir stiprius. Platus polimerų ir polimerinių medžiagų pasirinkimas leidžia pritaikyti juos skirtingoms pramonės šakoms. Tai skatina šios universalios medžiagos naudojimo didėjimą pasaulyje. Mokslininkai ir toliau stengiasi atrasti naujus polimerus, modifikuoti esamus, kurti naujus medžiagų derinius – tai dar labiau padidina šių medžiagų lankstumą ir prisitaikymą bei galimą panaudojimą gamyboje.

Plastikų sujungimas yra svarbus žingsnis gaminant detales. Šis procesas naudojamas, kai detalės pagaminimas yra neįmanomas dėl didelės pagaminimo kainos, sudėtingumo arba, kai toje pačioje detalėje norima naudoti skirtingas polimerines medžiagas. Sujungimas dažniausiai yra paskutinis bet kurio gamybos ciklo žingsnis. Yra įvairių plastikų jungimo būdų (žr. 1.1 pav.). Plastikų ir kompozitų sujungimo metodai gali būti suskirstyti į tris pagrindines kategorijas: mechaninis tvirtinimas, klijavimas bei suvirinimas [2].



1.1 pav. Plastikų sujungimo būdai [2]

**Mechaninis tvirtinimas** – šiam metodui reikia papildomų dalių, tvirtinimo detalių. Naudojami plastikiniai arba metaliniai varžtai, poveržlės, kniedės, priklausomai nuo detalės dizaino ir tvirtinimo būdo reikalingumo. Tokiu būdu galima sujungti panašias bei skirtingas medžiagas. Šis metodas yra vienas dažniausiai naudojamų, norint sujungti plastiką su metalu, kai jungtis galima išardyti. Šio jungimo privalumai: didelis jungimo tipo pasirinkimas, nereikalingas specialus paviršiaus apdirbimas. Pagrindinis trūkumas – didesni koncentruoti įtempiai aplink sujungimo vietas ir angas. Šis būdas yra dažnai naudojamas automobilių, statybos bei aviacijos pramonėje.

**Klijavimas** – tai metodas, kai tarp klijuojamų dalių yra dedami klijai. Tai medžiaga, jungianti ir perduodanti apkrovas iš vienos detalės į kitą. Metodas plačiai naudojamas dėl savo mažų sąnaudų ir prisitaikymo, prie didelės spartos, gamyboje. Be to, suklijuotos medžiagos iš dalies suteikia vienodus

įtempių pasiskirstymus tarp medžiagų ir aukštą stiprumo bei svorio santykį. Klėjai gali būti naudojami beveik su visais plastikais.

**Suvirinimas** – tai metodas, kuriuo sujungiami termoplastikai, naudojant šilumą, gaunamą tam tikro proceso metu. Šis būdas yra plačiai naudojamas gamybos pramonėje. Tai vienas patikimiausių plastikų sujungimo būdų. Priklausomai nuo plastiko medžiagos tipo bei numatyto naudojimo, yra pasirenkamas tam tikras suvirinimo būdas, pavyzdžiui, ultragarsinis suvirinimas, frikcinis suvirinimas ir kt.

## 1.2. Pagrindiniai suvirinimo žingsniai

Daugelis suvirinimo procesų turi penkis etapus. Vieniems suvirinimo procesams šie žingsniai yra nuoseklūs, o kitiems – keli žingsniai gali vykti vienu metu. Pagrindiniai suvirinimo etapai yra:

- paviršiaus paruošimas;
- kaitinimas;
- spaudimas;
- intermolekulinė difuzija;
- aušinimas.

**Paviršiaus paruošimas** – tai pirmasis žingsnis, kurio metu plastmasinės dalys yra paruošiamos suvirinimui. Šis etapas ypač svarbus, kai naudojami rankiniai arba pusiau automatizuoti procesai. Paviršiaus paruošimas apima apdirbimą, kurio metu užtikrinamas reikiamas lygumas, ir valymą. Paprastai valymas atliekamas naudojant tirpiklį, kad nuo paviršiaus būtų pašalinti visi nešvarumai. Šis paviršiaus paruošimas yra mažai naudojamas automatizuotose suvirinimo procesuose.

**Kaitinimas** – yra keletas skirtingų būdų plastiko suvirinimui kaitinant. Visais suvirinimo būdais, paviršius šalia suvirinimo sąsajos yra šildomas, tokiu būdu išlydant arba suminkštinant polimerą. Dėl iš dalies mažo polimerų šilumos laidumo, greitesnis ir efektyvesnis būdas yra plastiką lydyti šalia suvirinimo jungties, nei laukti, kol išsilydys visa zona aplink norimą sujungti siūlę. Visos detalės išlydymas yra neleistinas, dėl kaitinimo etapo metu galimų suvirinimos detalės deformacijų. Paprastai kaitinimas ir šildymas yra laikomas svarbiausiu suvirinimo proceso etapu, nes sujungimas nėra įmanomas be išlydyto plastiko.

**Spaudimas** – šio etapo metu yra nustatomos suvirinimo zonos ir sukuriamas kontaktas, kurio metu vyksta spaudimas. Tai daroma dviem etapais. Pirmajame etape paviršius yra deformuojamas ir pasiekiamas kontaktas. Antrajame etape detalės yra suspaudžiamos, tokiu būdu pašalinamos bet kokios dujos, esančios plastikuose.

**Intermolekulinė difuzija** – sujungus plastiką spaudimo būdu, norint užbaigti procesą, atliekama difuzinė ir makromolekulinė grandinė, kuri sukuria tvirtą suvirinimo siūlę. Difuzija laikoma baigta, kai dviejų detalių sandūroje nebėra birių medžiagų ir dvi skirtingos detalės tampa viena detale.

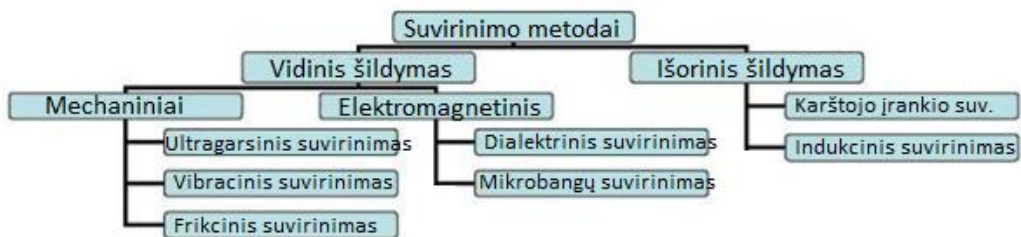
**Aušinimas** – etapas, kurio metu suvirinta medžiaga yra atvėsinama ir gauta detalė yra paruošta naudojimui.

### 1.3. Suvirinimo metodų klasifikavimas

Plastiko suvirinimo metodai yra klasifikuojami ir identifikuojami pagal šildymo metodus [3]. Visi suvirinimo metodai gali būti suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas: išorinį ir vidinį šildymą (žr. 1.2 pav.). Išoriniai šildymo metodai priklauso nuo konvekcijos arba šilumos laidumo į suvirinimo paviršių. Šie suvirinimo būdai yra: karštojo įrankio suvirinimas, indukcinis suvirinimas.

Vidiniai šildymo metodai toliau skirstomi į dvi kategorijas: vidinis mechaninis šildymas ir vidinis elektromagnetinis šildymas. Vidiniai mechaniniai šildymo metodai, tai mechaninės energijos principas, kai trintis paverčiama šiluma. Šie suvirinimo būdai yra: ultragarsinis suvirinimas, vibracinis suvirinimas, frikcinis suvirinimas.

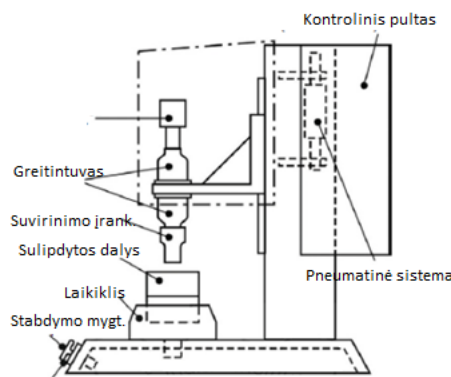
Vidiniai elektromagnetiniai šildymo metodai priklauso nuo elektromagnetinės spinduliuotės absorbcijos ir konversijos į šilumą. Šie suvirinimo metodai: dialektrinis suvirinimas ir suvirinimas mikrobangomis. Pagrindiniai plastiko suvirinimo metodai plačiau aptariami kituose skyriuose.



1.2 pav. Suvirinimo metodai [3]

#### 1.3.1. Ultragarsinis plastiko suvirinimas

Ultragarsinis plastiko suvirinimas yra termoplastikų sujungimas naudojant šilumą, gaunamą iš aukšto dažnio mechaninio judėsio. Mechaninis judėjimas kartu su naudojama jėga sukuria trinties šilumą plastikinių komponentų paviršiuje. Plastikinės detalės paviršius tirpsta ir tarp dalių susidaro molekulinė jungtis. Dažnis yra apie 20–40 kHz. 1.3 pav. pavaizduota ultragarsinio suvirinimo aparato schema. Elektros energijos tiekimas suteikia aukšto dažnio elektros energiją paprastam pjezoelektriniam keitikliui, kurio gale ši elektros energija sukuria aukšto dažnio mechaninę vibraciją. Toliau stiprintuvus sustiprina mechanines vibracijas. 1.1 lentelėje pateikti ultragarsinio suvirinimo privalumai ir trūkumai.



1.3 pav. Ultragarsinis aparatas [3]

### 1.1 lentelė. Ultragarso suvirinimo privalumai ir trūkumai

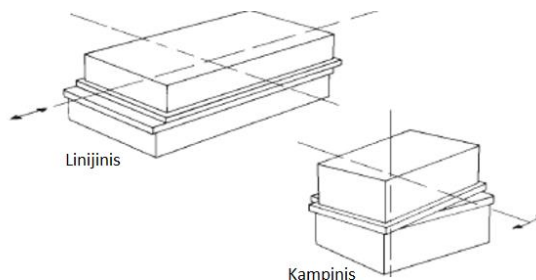
Privalumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Greitas, ekonomiškas ir lengvai automatizuojamas.</li> <li>• Didesnis lankstumas ir universalumas.</li> <li>• Galimas didelių struktūrų sujungimas.</li> <li>• Naudojamas ir sveikatos priežiūros pramonėje dėl švaraus suvirinimo.</li> <li>• Padeda iškart suformuoti didelio stiprumo jungtis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didesnės jungtys (&gt;250 x 300 mm) negali būti suvirintos vienos operacijos metu.</li> <li>• Ultragarso vibracijos gali sugadinti suvirinamus komponentus.</li> <li>• Įrankių kainos.</li> <li>• Reikalingos specialios jungtys.</li> </ul>

#### 1.3.1.1 Ultragarso suvirinimo taikymas

Ultragarso suvirinimas daugiausiai naudojamas automobilių pramonėje, siekiant pagaminti priekinių žibintų dalis, prietaisų skydus, mygtukus ir jungiklius, skysčių indus, saugos diržų užraktus, elektroninius raktų šviestuvus, ortakius. Ultragarso suvirinimas taip pat naudojamas elektriniuose prietaisuose: jungikliuose, įvairiuose jutikliuose ir duomenų saugojimo raktuose. Taip pat šis suvirinimo metodas naudojamas medicininėms dalims, pavyzdžiui: filtrams, kateteriams, medicinos drabužiams ir kaukėms gaminti. Ultragarso suvirinimas taip pat naudojamas įvairioms pakuotėms, maišeliams, mėgintuvėliams gaminti.

#### 1.3.2 Vibracinis plastiko suvirinimas

Vibracinio suvirinimo metu, suvirinimo siūlė (3 – 5 mm) termoplastikuose atsiranda dėl šilumos, kurią sukuria mažų dažnių vibracijos (120 Hz). Dvi išlydytos medžiagos susijungia į vieną dėl slėgio, kuriuo sukuriama spaudimas, medžiaga atvėsinama. 1.4 pav. Pavaizduotas detalių judėjimas vibracinio suvirinimo proceso metu. Vibracijos kryptis yra lygiagrečiai su apdirbama detale, o ne statmena, kaip ultragarso suvirinimo atveju. Taip pat vibracija gali būti tiesinė arba kampinė [3].



1.4 pav. Detalių judėjimas vibracinio suvirinimo metu [3]

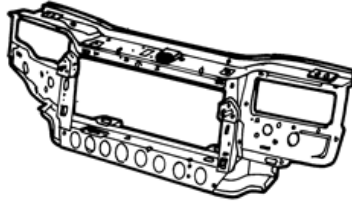
### 1.2 lentelė. Vibracinio suvirinimo privalumai ir trūkumai

Privalumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suvirinimas atliekamas per trumpą laiką.</li> <li>• Nesvarbus paviršio paruošimas.</li> <li>• Nereikia įstatyti papildomų medžiagų tarp suvirinamų ruošinių.</li> <li>• Galima pagaminti didelio stiprumo, atsparumo hermetiškus sandariklius.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelės išlaidos įrangai, įrankiams, palyginus su ultragarso suvirinimu.</li> <li>• Smulkių kietųjų dalelių susidarymas jungiamojoje linijoje, nes po suvirinimo operacijos reikia papildomo detalės apdirbimo.</li> </ul>



### 1.3.2.1 Vibracinio suvirinimo taikymas

Vibracinio suvirinimo naudojimas apima plastikinių buferių, priekinių ir galinių žibintų gamybą, prietaisų skydelio mazgų sujungimą (žr. 1.5 pav.), oro kondicionavimo ir šildymo kanalų gamybą. Taip pat šis suvirinimo metodas yra naudojamas oro įsiurbimo kolektoriams, kai norima sujungti dvi arba tris išlietas formas ir tokiu būdu gaunamas galutinis kolektorius.

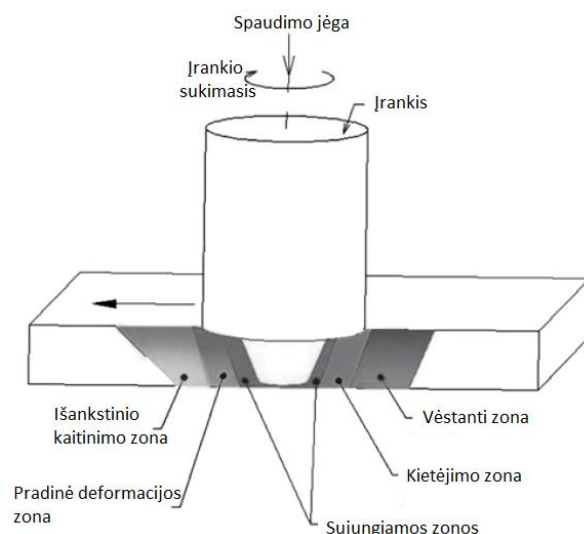


1.5 pav. Prietaisų skydelių surinkimas [4]

### 1.3.3 Frikcinis maišymo suvirinimas

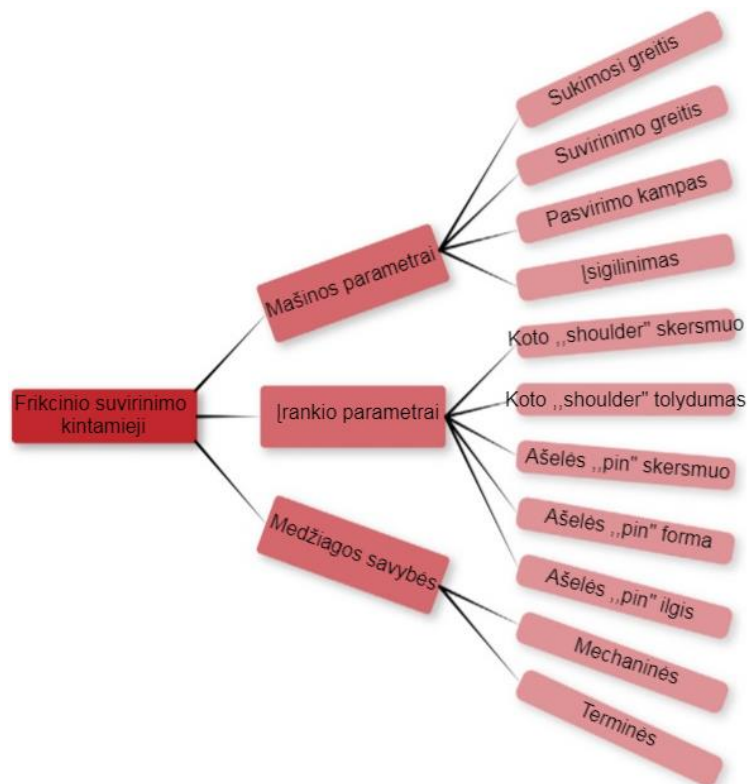
Frikcinis maišymo suvirinimas buvo išrastas Jungtinėje Karalystėje, 1991 m. Šis metodas iš pradžių buvo taikomas tik aliuminio lydiniams sujungti [3]. Dabar frikcinis (arba kitaip dar vadinamas maišymo) suvirinimas yra naudojama termoplastinėms dalims, ruošiniams sujungti. Frikcinio suvirinimo veikimas yra pagrįstas mechaninės energijos pavertimu į šilumos energiją. Įrankis, besisukdamas didele sparta, sukuria trintį, kurios metu susidaro trinties šiluma, kuri šildo kontakto paviršių ir spaudžiamos detalės yra suvirinamos į vieną (žr. 1.6 pav.). Kai sukimosi judesys yra sustabdomas, spaudimo slėgis išlieka iki tol, kol medžiaga sukietėja ir yra sudaroma galutinė jungtis. Pagrindiniai šio suvirinimo būdai yra: tiesinis, sukamasis ir kampinis suvirinimas. Priklausomai nuo to, kokios medžiagos yra suvirinamos, įrankio sukimosi dažnis svyruoja nuo 1000–6000 aps/min, tam kad suvirinimo metu būtų pasiekta lydymosi temperatūra [5]. Palyginti su ultragarsiniu suvirinimu, šio tipo suvirinimo dydis yra neapribotas. Suvirinimo sistemos suvirinimo zona yra skirstoma į atskiras sritis:

- nepaveiktos medžiagos zona arba pirminis metalas. Tai ruošinio dalis, nutolusi nuo suvirinimo proceso, tačiau galėjusi patirti šiluminį poveikį, bet tai nesukelia medžiagos struktūros ar medžiagos mechaninių savybių pasikeitimo;
- su šiluma susijusi zona. Ši zona yra arčiau suvirinimo centro, medžiaga patiria terminį poveikį, kuris pakeičia medžiagos mikrostruktūrą ir jos mechanines savybes, tačiau dar nesukelia plastinių deformacijų;
- termomechanškai paveikta zona. Šioje zonoje šiluma, išskirta frikcinio suvirinimo metu, ir įrankis deformuoja medžiagą;
- perkristalizuota zona. Ši zona vadinama maišymo zona, kurią užima frikcinio suvirinimo įrankio galas.



**1.6 pav.** Frikcinis suvirinimas [5]

Frikcinis suvirinimas yra laikomas vienu svarbiausių dviejų ruošinių, detalių sujungimo būdų. Tai yra energiją tausojanti technologija dėl savo energijos vartojimo efektyvumo, aplinkosaugos ir universalumo. Taikant įprastinius suvirinimo metodus, frikcinis suvirinimas naudoja mažiau energijos, taip pat nereikalauja jokių papildomų medžiagų. 1.3 lentelėje pateikiami šio suvirinimo būdo privalumai bei trūkumai. Frikcinio suvirinimo metu labai svarbu tinkamai pasirinkti reikiamus parametrus, kurie užtikrintų stiprią ir nenutrūkstamą jungtį. Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką suvirinimo kokybei, pavaizduoti 1.7 paveikslėlyje.



**1.7 pav.** Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką plastikų frikcinio maišymo suvirinimo kokybei [21]

### 1.3 lentelė. Frikcinio suvirinimo privalumai ir trūkumai

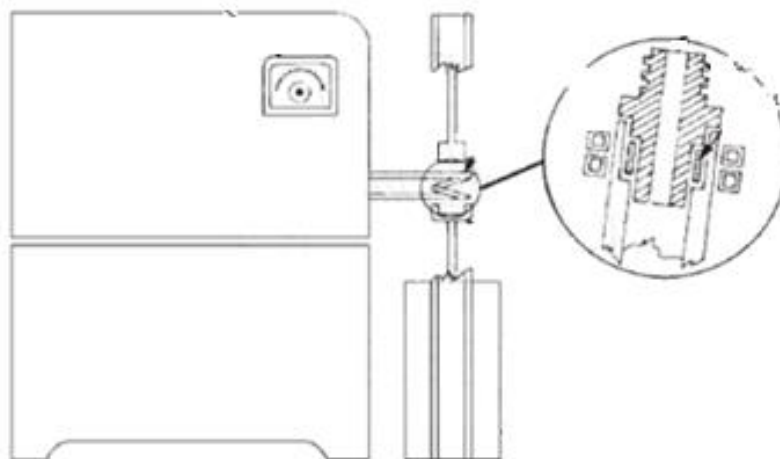
Privalumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"><li>• Paprastas ir efektyvus suvirinimo procesas.</li><li>• Tinka automatizavimui.</li><li>• Gali būti sudaromi stiprūs hermetiški sujungimai.</li><li>• Tarp ruošinių nereikia įstatyti papildomų medžiagų.</li><li>• Galima suvirinti daugiau nei 1 m skersmens detales.</li><li>• Suvirinimo siūlės neturi defektų: įtrūkimų, poringumo.</li><li>• Nereikia kvalifikuotų specialistų.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Smulkių kietųjų dalelių susidarymas jungiamojoje linijoje.</li></ul>

#### 1.3.3.1 Frikcinio maišymo suvirinimo taikymas

Frikcinis maišymo suvirinimas yra naudojamas statybinių medžiagų, ventiliacijos vamzdžių sujungimui, taip pat naudojamas polietileno vamzdžių sujungimui ir remontui, elektronikos, naftos pramonėje, kuro filtrams, vožtuvams, sunkvežimių ir automobilių žibintų gamyboje.

#### 1.3.4 Indukcinis plastiko suvirinimas

Indukcinis suvirinimas naudoja elektromagnetinę indukciją ruošiniui įkaitinti [8]. Suvirinimo sistema paprastai yra indukcinė ritė, kuri maitinama tam tikro dažnio elektros srove. Sugeneruojamas aukšto dažnio elektromagnetinis laukas, kuris veikia ruošinį. Ruošinyje pagrindinis šildymo efektas yra varžinis šildymas dėl sukeltos srovės, dar vadinamos sūkurine srove. Jungiant plastikus tarpusavyje tarp sudedamųjų dalių yra įstatoma papildoma medžiaga – metalas ar feromagnetinė medžiaga. Toliau ši dalis yra įdedama į indukcinę ritę arba šalia jos, per kurią perduodama aukšto dažnio kintamoji srovė. Elektromagnetinis laukas, dėl srovės atsirandantis ritėje, generuoja šilumą metalinėse dalelėse. Karštos metalinės dalelės išlydo termoplastines detales ir taip sujungia jas. 1.8 pav. Pavaizduotas įrenginys, naudojamas indukciniam suvirinimui.



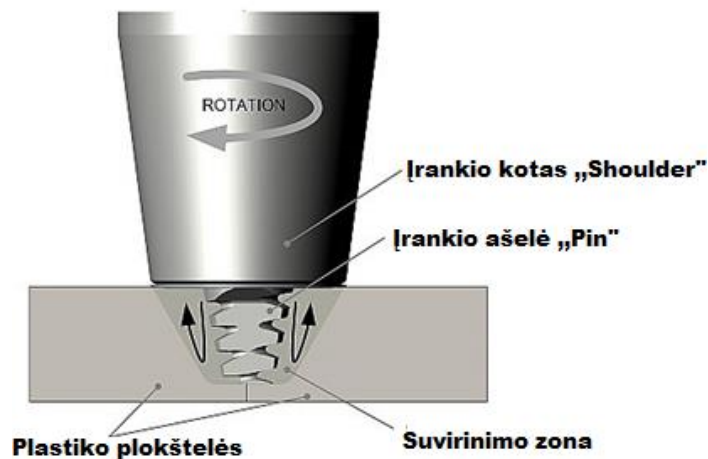
1.8 pav. Įrenginys, naudojamas indukciniam suvirinimui [8]

**1.4 lentelė. Indukcinio suvirinimo privalumai ir trūkumai**

Privalumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>Galimos stiprios ir hermetiškos jungtys.</li> <li>Sujungimo vietoje yra užpildomos visos pažeistos formavimo vietos.</li> <li>Vienu metu galima suvirinti kelias jungtis.</li> <li>Suvirinta vieta gali būti tvarkoma pakartotinai.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Papildomos išlaidos dėl tarp plastmasinių ruošinių dedamos metalinės plokštelės.</li> <li>Kartais tarpinė metalinė plokštelė mechaniškai veikia sujungiamus mechanizmus.</li> </ul>

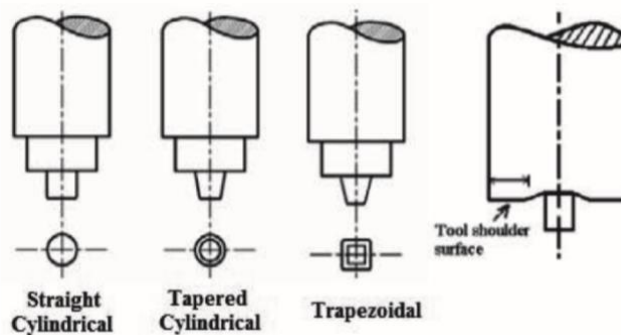
**1.4. Įrankių tipai naudojami frikciniam maišymo suvirinime**

Tradicinis frikcinis maišymo suvirinimas susideda iš sukamojo įrankio, kurį sudaro „pin“ – ašelė ir „shoulder“ – kotas. Norint teisingai suvirinti tam tikras medžiagas, reikia rasti atitinkamą įrankį. Įrankio geometrija daro įtaką šilumos gamybai, judėjimo jėgai, sukimo momentui ir termomechaninei aplinkai, su kuria susiduria įrankis. Svarbūs faktoriai yra koto skersmuo, ašelės geometrija, įrankių paviršius ir paviršiaus kampas.



1.9 pav. Įrankio „Pin“ ir „Shoulder“ dalys [7]

Frikcinio suvirinimo ašelė, sukelia deformacinę ir frikcinę kaitinimą prie jungimo siūlės. Ašelė sukurta taip, kad kontaktinis paviršius susimaišytu su įrankiu ir maišoma medžiaga būtų perkeliama už įrankio. Deformacijos gylį ir įrankio važiuavimo greitį reguliuoja ašelės konstrukcija.



1.10 pav. Ašelės „Pin“ formų pasirinkimas [7]

## 1.5 Taškinis ir siūlinis suvirinimas

Dažniausiai pramonėje naudojamas dviejų tipų suvirinimas – taškinis ir siūlinis. Taškinis suvirinimas, kai suvirinama ne visa detalė ištisai, o tam tikri jos taškai. Šis būdas plačiai naudojamas, kadangi gaunamas paprastas ir tvirtas tam tikrų detalių mazgų sujungimas lyginant jį su kitais būdais. Siūlinis suvirinimas plačiai naudojamas įvairių lakštų jungimui. Būtina atsižvelgti į taškų išdėstymo žingsnį, nes šioms jungtims būdinga didelė įtempių koncentracija. Todėl šis metodas yra blogas pasirinkimas jei apkrovos yra kintamos.

Siūlinis suvirinimas dažniausiai naudojamas norint gauti hermetišką detalę. Detalių jungimas vyksta tolygiai, įkatę ruošiniai sąlyčio vietoje išsilydo, o šiai vietai ataušus gaunama aukštos kokybės jungtis. Šis metodas dažniausiai naudojamas plastiko gamyboje, nes yra patikimas, galima gauti labai stiprias jungtis, atlaiko didelias apkrovas, yra ilgaamžis. Tai žymiai patvaresnis būdas lyginant jį su taškiniu. Suvirinimo tipas pasirenkamas priklausomai nuo to, kur bus naudojamos detalės, nes taškinis suvirinimas yra našesnis.

## 1.6 Suvirinimo defektai, atsiradimo priežastys

Priskiriama daug skirtingų suvirinimo defektų – nuo žymes ant detalių paliekančių įrankių iki sintezės problemų. Visi defektai turi vieną bendrą bruožą – maži defektai gali iššaukti dar didesnių defektų atsiradimą. Jie gali atsirasti iš karto po suvirinimo proceso arba pačio suvirinimo metu. Bet kuriuo atveju aptikta problema rodo, kad komponentas ar gaminytis yra netinkamas naudojimui arba jį reikia taisyti. Kai kuriuos defektus sukelia netinkamo dydžio suvirinti plastikiniai gabalai, kitus defektus iššaukia suvirinimo metu per didelės arba žemos temperatūros, tačiau galutiniame rezultate gaunamas suvirinimo brokas. Dažniausi plastiko suvirinimo defektai yra:

- sintezės nebuvimas. Jei trūksta sintezės, suvirinimo proceso metu šildymas buvo nepakankamas arba buvo naudojamos nesuderinamos medžiagos;
- poringumas. Suvirinti gaminiai praranda ilgaamžiškumą, kai suvirintose vietose yra per daug kiaušų tarpų. Priežastys gali būti žemos kokybės polimerų naudojimas arba per didelė drėgmė detalėje;
- išmontavimas. Plastiko suvirinimo defektai atsiranda dėl netinkamos konstrukcijos dalies arba konstrukcijos defekto gamybos proceso metu;
- nepakankamas suvirinimas. Defektas atsiranda dėl netinkamo arba neužbaigto suvirinimo, netinkamo proceso parametrų nustatymo;
- įrankių žymės. Jei, atlikus suvirinimo darbą, yra matomos įrankio žymės, yra tikimybė, jog naudojamas įrankis netinkamas plastikiniams gaminiams suvirinti;
- apdegimas. Dažnai pasitaikantis kosmetinis defektas, tai yra sudegintos arba apdegintos dalys, kurį sukelia per didelis karštis.

Vienas efektyviausių būdų išvengti defektų yra patikėti suvirinimo darbą profesionalui – suvirintojui, kuris buvo apmokytas specialiose įstaigose, turi techninių bei praktinių žinių. Jis žinos, kokius tinkamus įrankius reikia rinktis vienai ar kitai operacijai, taip pat išmanys procesų principus ir terminologiją.

Dažniausiai pasitaikančios klaidos plastiko suvirinime, kurios gali užkirsti kelią pakankamam šilumos ir slėgio pasiekimui:

- nepakankamas lydymosi laikas (*dwell time*). Norint sukurti stiprią, suvirintą medžiagą, šiluma turi prasiskverbti į plastikines siūlių briaunas. Šis šilumos gylis reguliuojamas užprogramuota lydymosi laiko trukme. Jei lydymosi laikas yra per trumpas, šiluma nepakankamai išsiskvoja po plastikinę suvirinamą detalę. Ir atvirkščiai, jei medžiagai leidžiama įsisavinti per daug šilumos, bus sunku pasiekti stiprų suvirinimą.
- per ilgas atviro darbo laikas. Laikas nuo tada, kai sujungiamos dalys atsilieka nuo kaitinamo įrankio, vadinamas atviruoju laiku. Labai svarbu kuo labiau jį sumažinti. Ilgesnis laikas ant jungiamų detalių sukuria plėvelę, kuri silpnina lydytą medžiagą. Dėl šios priežasties perėjimas tarp šilumos ir sandarinimo fazių turi būti greitas ir efektyvus.

## 1.7 Polimerai

Iki šiol, iš tūkstančių esančių polimerų, tik pusšimtis buvo ištirtas ir išaiškintas jų suderinamumas su frikciniu maišymo suvirinimu. Brigham Youngo universitete (BYU) buvo tarpusavyje sujungtas PP (polipropileno) plastikas su iki 90 % išliekamu stiprumu. Taip pat nustatyta, kad ABS (akrilnitrilo butadieno stireno polimeras) gali būti lengvai sujungiamas naudojant frikcinį suvirinimą pasiekiant 75 % medžiagos stiprumą. Tuo tarpu nustatyta, jog PTFE (politetrafluoroetileno) polimeras negali būti suvirinimas naudojant anksčiau minėtu suvirinimo būdu.

Brigham Youngo universitete (BYU) tyrimai parodė daug žadančius rezultatus suvirinant įvairias medžiagas. Kai kurioms medžiagoms prireikė koreguoti suvirinimo parametrus norint gauti stipresnį sujungimo ryšį. Pagrindiniai suvirinti bandiniai ir jų palyginimas pagal stiprumą nurodytas 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Polimerų tempimo stiprumas

Polimeras	Pagrindinė medžiaga	Friccinio maišymo suvirinimo rezultatai	
	Didžiausias tempiamasis įtempis (MPa)	Didžiausias tempiamasis įtempis (MPa)	% Didžiausias tempiamasis įtempis nuo pagrindinės medžiagos
ABS	34,1	32,7	96
HDPE	22,5	21,5	95
PA	72,4	28,4	39
PC	68,3	57,1	83
PMMA	42,0	21,5	51
PP	31,3	30,6	98

Buvo pastebėta, kad polimerai, kurie turi aukštesnę lydymosi temperatūrą ir klampumą, reikalauja aukštesnių apdirbimo režimų, pavyzdžiui, greitesnio įrankio sukimosi dažnio, kad būtų sukuriama aukštos temperatūros zona ir pasiektas medžiagos lydymasis. Mažas įrankio pastūmos greitis suteikia laiko tinkamai išmaišyti medžiagą, tuo tarpu naudojant didesnius pastūmos greičius, medžiagos suminkštinimas ir maišymas yra labai sudėtingas. To priežastis – prastas polimerų temperatūrinis laidumas. Atlikti skirtingų tipų polimerų sujungimą yra labai sudėtinga dėl mechaninių, cheminių, temperatūrinių, metalurginių savybių skirtingumo.

## 1.8 Užsienio mokslininkų bandymų rezultatai

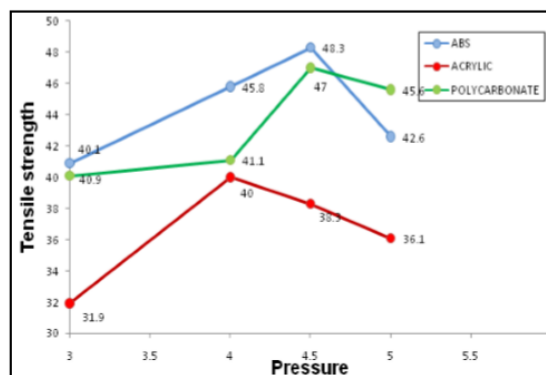
Ultragarsinį plastiko suvirinimą tyrė K. Patelis ir kt. (2013). Tyrime [10] buvo aiškinamasis siūlės stiprumas keičiant suvirinimo laiką, suvirinimo detalės prispaudimo jėgą, taip pat suvirinant du skirtingus plastikus. Gautas rezultatas buvo suvirinimo siūlės stiprumas.

1.11 pav. pavaizduota trijų skirtingų medžiagų stiprumo nuo slėgio priklausomybė, esant tam pačiam suvirinimo laikui. Šis darbas parodo, jog ABS medžiagos suvirinimo stiprumas yra didesnis lyginant su polikarbonatu ir akrilo medžiaga. Esant 3.0 bar slėgiui atlaikoma tempimo jėga yra 40.1 MPa. Kai slėgis padidėja 1 bar, tempimo stipris taip pat padidėja 45.8 MPa.

Sr no	WT	WP	TS	Sr no	WT	WP	TS
1	1.0	3.0	20.3	1	1.0	3.0	28.0
2	1.0	4.0	25.1	2	1.0	4.0	32.0
3	1.0	4.5	28.3	3	1.0	4.5	35.0
4	1.0	5.0	30.9	4	1.0	5.0	36.2
5	1.5	3.0	23.0	5	1.5	3.0	30.6
6	1.5	4.0	28.2	6	1.5	4.0	35.3
7	1.5	4.5	31.4	7	1.5	4.5	38.9

**1.11 pav.** ABS ir akrilo suvirinimo bandymai (WT – suvirinimo laikas, s; WP – slėgis, bar; TS – gautas suvirinimo siūlės stiprumas, MPa [10])

Pagal šiame darbe [10] pateiktas ultragarsinio suvirinimo tyrimo išvadas, suvirinimo laikas yra svarbiausias stiprumo faktorius ultragarsinio suvirinimo metu. Medžiagų pasirinkimas taip pat reikšmingas faktorius, norint gauti stipresnę jungtį tarp plastikų. Nagrinėto eksperimento pavyzdžiu, tai yra ABS plastikas, kuris būtų geriausias pasirinkimas lyginant su akrilu (žr. 1.12 pav.).



**1.12 pav.** Suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybė nuo slėgio ultragarsinio suvirinimo metu [10]

Polietileno (PE) plastiko frikcinio suvirinimo stiprumo tyrimas buvo aptartas Y. Bozkurto (2011) moksliniame straipsnyje [12]. 1.13 pav. pavaizduoti parametrai, pasirinkti norint ištirti frikcinio suvirinimo siūlės stiprumą. Gauti rezultatai pateikti 1.14 pav.

**Table 2**  
Experimental layout using an L9 orthogonal array.

Experiment number	FSW process parameters			Error
	A	B	C	D
	Tool rotation speed (rpm)	Tool traverse speed (mm/min)	Tilt angle (°)	
1	1500	45	1	
2	1500	75	2	
3	1500	115	3	
4	2100	45	2	
5	2100	75	3	
6	2100	115	1	
7	3000	45	3	
8	3000	75	1	
9	3000	115	2	

**1.13 pav.** PE plastiko frikcinio suvirinimo pasirinkti parametrai [12]

**Table 3**  
Tensile test results and calculated S/N ratios.

Experiment number	Ultimate tensile strength (MPa)	Joint efficiency (%)	Calculated S/N ratio (dB)
1	10.4	46.2	20.34
2	11.7	52	21.36
3	17.2	78.2	24.71
4	16.6	73.8	24.40
5	14.1	62.7	22.98
6	16.2	72	24.19
7	18.5	82.2	25.34
8	19.0	84.4	25.57
9	19.4	86.2	25.75

**1.14 pav.** PE plastiko frikcinio suvirinimo metu gautos siūlės stiprumas [12]

Gauti rezultatai parodo, kad stipriausia frikcinio maišymo būdu gauta suvirinimo siūlė buvo pasiekta devintuoju bandymu, kurio apdirbimo parametrai buvo 3000 aps/min, ir suvirinimo greitis 115 mm/min. Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad norint efektyviai suvirinti PE plastiką, reikia naudoti kuo didesnius įrankio sukimosi greičius (3000 aps/min).

Užsienio literatūroje rasti darbų pavyzdžiai rodo, kad bandymai, atlikti frikcinio maišymo suvirinimo tema šiuo metu yra populiarūs ir aktualūs.

### 1.9 Literatūros apibendrinimas

Atlikus literatūros analizę, susipažinta su pagrindiniais plastiko suvirinimo tipais, taip pat plastikų charakteristikomis. Šiame darbe svarbiausias dėmesys skiriamas į tai, kokią įtaką siūlės stiprumui turi pastūma, sukimos greitis bei pasirinktos medžiagos. Buvo aptarta, kad plastikas pasižymi puikiu jėgos ir svorio santykiu, atsparumu ir maža kaina, dėl to yra plačiai paplitęs ir naudojamas įvairiose srityse: automobilių, medicinos, statybos ir chemijos pramonėse.

Plastiką pasirinkta suvirinti frikcinio maišymo būdu, nes šis būdas lyginant su kitais yra paprastas ir efektyvus, gali būti sudaromi stiprūs sujungimai. Frikcinis suvirinimas yra laikomas vienu iš svarbiausių būdų sujungti plastikines dalis.



Pasirinkta suvirinti šiuos plastikus:

- **ABS** – akrilnitrilas butadienas stirenas, priklauso termoplastikų šeimai, turintis platų eksploatacinių savybių spektrą. Pasirinkta naudoti šį plastiką, nes jis dažnai sutinkamas kasdieninėje aplinkoje. Jis yra naudojamas elektronikos ir naftos pramonėje, iš jo gaminamos įvairios automobilių salono dalys, žaislai, kompiuterių dalys. Atlikus literatūros analizę buvo rasta mokslinių straipsnių, kurie patvirtino šio plastiko tinkamumą frikciniam maišymo suvirinimui. Šiam plastikui akrilnitrilas suteikia cheminį atsparumą ir tvirtumą, butadienas – suteikia gaminiui atsparumą smūgiams ir dilimui. Stirenas – prisideda prie blizgesio, lengvumo apdoroti ir tvirtumo. ABS pasižymi puikiu tvirtumu, lengvu apdirbimu, cheminiu atsparumu ir pigumu.
- **PE** – tarp svarbiausių ir universaliausių komercinių termoplastikų yra polietilenas (PE). Polietilenas yra naudojamas įvairiose srityse, pvz.: pramonėje, nes šio polimero struktūra pasižymi lengvu įvairių formų gaminimu. Iš jo gaminami plastikiniai konteineriai, buteliai, maišeliai, žaislai. Norint išlieti ar pagaminti sudėtingą, didesnių matmenų gaminį, reikia naudoti papildomo sujungimo metodus. Šis plastikas pasižymi puikiu atsparumu daugumai tirpiklių, alkoholiams, rūgštims ir šarmams. Jis atsparus žemoms temperatūroms, pasižymi puikiomis elektros izoliacinėmis savybėmis.
- **PP** – šis plastikas labai atsparus susidevėjimui ir nuovargiui. Puikiai tinka gaminti daiktams, kurie patiria didelį krūvį. Polipropilenas yra patvaresnis plastikas nei dauguma kitų, pasižymi daugybe struktūrinių, cheminių ir fizinių pranašumų. Jo gamyba yra labai pigi dėl to šis plastikas yra naudojamas įvairiose srityse, pavyzdžiui, automobilių pramonėje. Jis naudojamas automobilių prietaisų skydams, buferiams, apmušalams ir išorės apdailai gaminti. Taip pat plačiai naudojamas medicinoje, iš jo gaminami chirurginiai įrankiai ir kt. įranga.

## 2. Eksperimentinė dalis

Eksperimentinis procesas vyko keliais etapais. Norint ištirti plastiko suvirinimo siūlės stiprumą, keičiant suvirinimo greitį ir įrankio sukimosi dažnį, buvo pasirinkta suvirinti tokius plastikus: ABS (akrilnitrilas butadienas stirenas), PP (polipropilenas) ir PE (polietilenas). Buvo pasigamintos plokštelės, kurių visų matmenys buvo 100x50x2 mm. ABS plastiko plokštelių iš viso buvo 38 vienetai, PE ir PP plastiko plokštelių buvo po 12 vienetų. Vėliau sekė įrankio ir suvirinimo parametrų pasirinkimas. Visi bandymai buvo atlikti su „Leadwell V-20“ CNC staklėmis, Kauno technologijos universiteto laboratorijoje. Sujungus visas plokšteles tarpusavyje, buvo atlikti tempimo bandymai su mašina „Tinius Olsen H10KT“. Toliau skyriuje bus plačiau aprašomos ir aptariamios visos darbo metu atliktos procedūros ir bandymai.

### 2.1 Eksperimento eiga

Literatūros apžvalga, kuri buvo aptarta pirmame skyriuje, atskleidė, kad pasirinkti frikcinio maišymo suvirinimo parametrai turi įtakos suvirinimo siūlės stiprumui. Svarbiausi parametrai norint gauti tvirtą ir kokybišką ištisinę suvirinimo siūlę yra tinkamai pasirinkti suvirinimo pastūmos ir įrankio sukimosi dažniai. Kiti proceso parametrai nebuvo keičiami. Eksperimentų metu įrankio pastūmos greitis kito nuo 10 mm/min iki 60 mm/min. Įrankio sukimosi dažnis svyravo nuo 2000 aps/min iki 7000 aps/min. Suvirinimo proceso atlikimo seka ir pasirinkti parametrai kiekvieno suvirinimo metu, pavaizduoti 2.1, 2.2 ir 2.3 lentelėse. Priklausomai nuo pasirinkto plastiko, suvirinimo parametrai buvo pasirinkti remiantis atlikta literatūros analize ir taip, kad leistų ištirti kuo platesnį parametrų diapozoną bei padėtų rasti kiekvienam plastikui geriausius frikcinio maišymo suvirinimo režimus.

2.1 lentelė. PE plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka

Nr.	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	„Dwell time“, s	Įrankio ašelės „pin“ forma
1.	5000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
2.	5000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
3.	5000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
4.	6000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
5.	6000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
6.	6000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė

2.2 lentelė. PP plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka

Nr.	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	„Dwell time“, s	Įrankio ašelės „pin“ forma
1.	6000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
2.	6000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
3.	6000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
4.	7000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
5.	7000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
6.	7000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė

### 2.3 lentelė. ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrai ir atlikimo seka

Nr.	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	„Dwell time“, s	Įrankio ašelės „pin“ forma
1.	2000	10	15	3mm. kvadrato formos ašelė
2.	2500	10	15	3 mm kvadrato formos ašelė
3.	3000	10	15	3 mm kvadrato formos ašelė
4.	3500	10	15	3 mm kvadrato formos ašelė
5.	2000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
6.	2500	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
7.	3000	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
8.	3500	20	15	3 mm kvadrato formos ašelė
9.	2000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
10.	2500	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
11.	3000	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
12.	3500	30	15	3 mm kvadrato formos ašelė
13.	2000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
14.	2500	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
15.	3000	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
16.	3500	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
17.	4500	40	15	3 mm kvadrato formos ašelė
18.	2500	60	15	3 mm kvadrato formos ašelė
19.	5000	60	15	3 mm kvadrato formos ašelė

### 2.2 Naudota įranga

Vienas iš frikcinio maišymo suvirinimo privalumų yra tai, kad šis suvirinimo procesas nereikalauja sudėtingos įrangos, kurios reikia, pavyzdžiui, atliekant suvirinimą vibraciniu būdu. Visi suvirinimo bandymai buvo atlikti naudojant „Leadwell V-20“ CNC stakles, Kauno technologijos universiteto laboratorijoje. „Leadwell V-20“ CNC staklių pagrindinės charakteristikos aprašytos 2.4 lentelėje, CNC staklės su valdymo bloku pavaizduotos 2.1 pav.

### 2.4 lentelė. CNC staklių „Leadwell V-20“ pagrindinės charakteristikos

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė
Stalo dydis (ilgis x plotis)	mm	600x350
Maksimalus stalo atlaikomas svoris	kg	220
Maksimalus suklio greitis	aps/min	8000
Maksimalus įrankio diametras	mm	89
Įrankio keitimo laikas	s	8,5
Mašinos matmenys (plotis x ilgis x aukštis)	mm	1900x2983x2504
Mašinos svoris	kg	3000



**2.1 pav.** CNC staklės „Leadwell V-20“ ir staklių valdymo blokas

Įrankio geometrija atlieka svarbų vaidmenį termomechaninėse charakteristikose, generuojant šilumą, frikcinio maišymo suvirinimo metu. Šilumos zonai įtakos turi įrankio koto „*shoulder*“ skersmuo ir įrankio ašelės „*pin*“ forma, jos ilgis. Mūsų pasirinktų suvirinimo plokštelių storis buvo 2 mm. Buvo nustatytas ašelės „*pin*“ pastovus ilgis – 1,7 mm, jos forma taip pat nebuvo keičiama. Visiems plastiko suvirinimo bandymams buvo naudojamas standartinis įrankis, kurio ašelė „*pin*“ buvo kvadrato formos, kurio viena kraštinė buvo 3 mm. Naudotas įrankio kotas „*shoulder*“ buvo įprastos cilindro formos, kurio skersmuo buvo 11 mm, o ilgis 12 mm. Naudotas suvirinimo įrankis pavaizduotas 2.2 paveiksle. Įrankio brėžinys pridėtas prieduose (žr. 3 priedą).

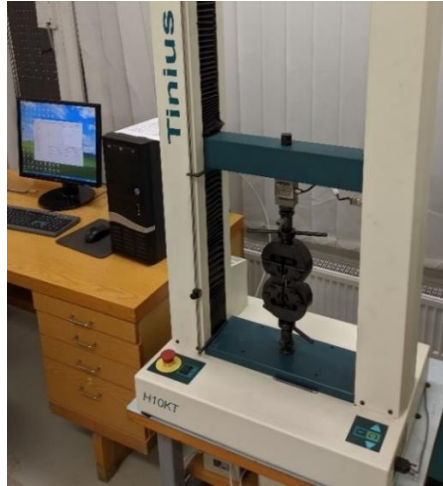


**2.2 pav.** Įrankis, naudotas plastiko frikcinio maišymo suvirinimui

Tarpusavyje suvirinus visas plastiko plokšteles buvo nustatytas suvirintos siūlės stiprumas, atliekant tempimo bandymus. Šiems bandymams atlikti buvo naudojama „Tinius Olsen H10KT“ įranga (žr. 2.3 pav.). Pagrindinės tempimo mašinos charakteristikos aprašytos 2.5 lentelėje. Kiekvieno tempimo bandymo metu, naudojant „Tinius Olsen H10KT“ (žr. 2.3 pav.) tempimo bandymo mašiną, rezultatai buvo gaunami, naudojant „QMAT Materials Testing & Analysis Software“ kompiuterinę įrangą.

## 2.5 lentelė. „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašinos pagrindinės charakteristikos

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė
Didžiausias atstumas tarp griebtuvų	mm	1090
Didžiausia išvystoma dinaminė jėga	kN	100
Rėmo standumas	kN/mm	100
Mašinos matmenys (ilgis x plotis x aukštis)	mm	729x506x1625
Svoris	kg	130



2.3 pav. „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašina

## 2.3 Frikcinio maišymo suvirinimo procesas

Prieš pradėdant suvirinimo procesą, specialiuose spaustuose buvo įtvirtintos plastiko plokštelės. Šie spaustuvai prilaikė plokšteles viso suvirinimo metu (žr. 2.4 pav.). Prieš pradėdant naudoti šį spaustuva, jis buvo patikrintas kalibru ar jo plokštuma, kurioje įsistatomos plastiko plokštelės, yra lygi. Įsitikinus, jog nukrypimų nėra, buvo pradėtas suvirinimo procesas. Laikiklis padėjo tvirtai, iš šonų, prispausti abi plokšteles, taip palikdamas vietas įrankiui, besisukančiam nustatytu greičiu, praeiti per šių plokštelių sankirtą ir jas suvirinti.



2.4 pav. Plokštelių įtvirtinimas laikiklyje

Vėliau laikiklis buvo įtvirtintas CNC staklėse. CNC mašinos valdymo bloko pagalba, mechaniniu būdu, buvo nustatyta nulinė ir pradinė įrankio padėtis, nuo kurios buvo pradėtas suvirinimo procesas. Tada buvo pasirašyta programa – g-kodas „g-code“ (žr. 1 priedą) ir pradėtas suvirinimo procesas.

Kai programa buvo patikrinta ir paleista, įrankis besisukdamas nustatytu greičiu įsmigo 1,7 mm gyliu į plastiko plokšteles. Pasiekus nustatytą gylį, įrankis sukosi vienoje vietoje 15 s. Kai įrankis ir ruošinys įkaito, kieti plastiko gabaliukai pradėjo minkštėti ir tirpti. Tada įrankis perėjo per visą dviejų plokštelių, esančių šalia viena kitos ilgį. Įrankis frikciniu maišymo būdu suvirinęs abi plastiko plokšteles sustojo ir grįžo į savo pradinę padėtį. Tada plokštelės buvo išimtos ir paliktos, leidžiant joms atvėsti. Frikcinio maišymo suvirinimo procesas pavaizduotas 2.5 paveiksle. Gautos suvirintos plastiko plokštelės pavaizduotos 2.6 paveiksle.



2.5 pav. PE plastiko frikcino maišymo suvirinimo bandymas



a) ABS plastikas



b) PE plastikas

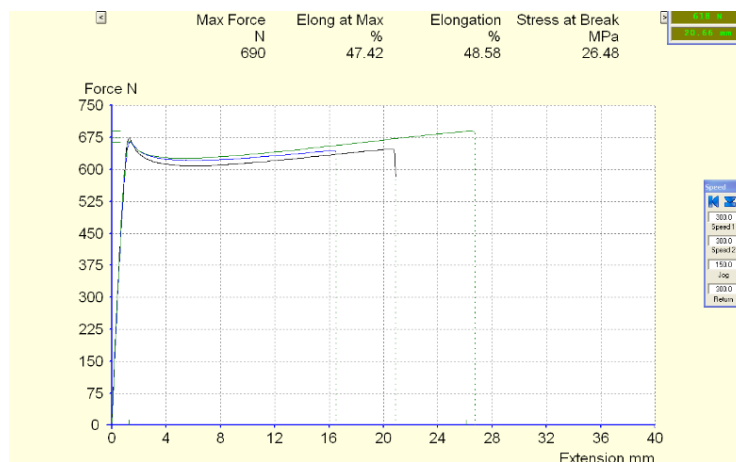
2.6 pav. Frikcino maišymo būdu suvirintos plokštelės

## 2.5 Rezultatai

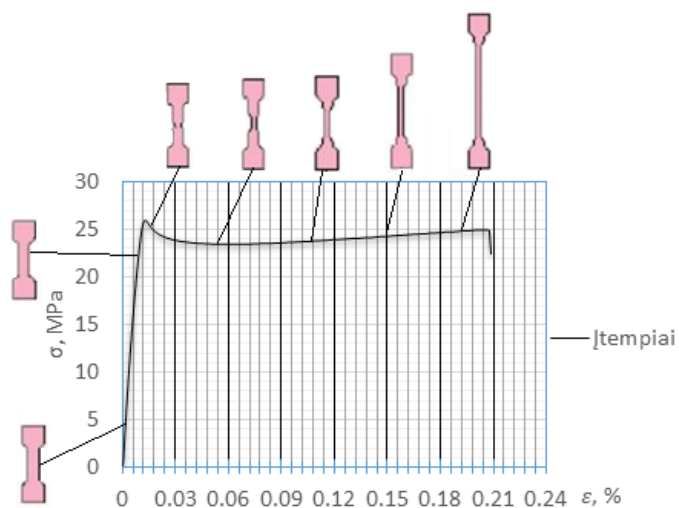
Gautos ABS, PP ir PE plastiko suvirinimo siūlės, jų stiprumas buvo ištestuotas su „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašina. Dėmesys buvo skirtas dviems svarbiausiems parametrams, kuriais buvo siekiama iširti, kokią įtaką suvirinimo siūlės stiprumui turi suvirinimo pastūmos greitis ir įrankio sukimosi dažnis. Iš pradžių buvo traukiami nesuvirinti, o monolitiniai bandiniai iš ABS, PP ir PE plastiko. Visų bandinių buvo po tris vienetus, norint užtikrinti tikslesnius rezultatus.

Kiekvieno tempimo bandymo metu, „Tinius Olsen H10KT“ tempimo bandymo mašinos rezultatai buvo gaunami naudojant „QMAT Materials Testing & Analysis Software“ kompiuterinę įrangą. Gautame grafike (žr. 2.7 pav.) matoma jėgos priklausomybė nuo bandinio pailgėjimo, kuri buvo paversta į įtempių – deformacijos kreivę (žr. 2.8 pav.).

Buvo tirti nesuvirintų bandinių didžiausi tempiamieji įtempiai plyšio momentu ir šie rezultatai vėliau buvo lyginami su frikcinio maišymo būdu suvirintais bandiniais. Nesuvirinto ABS plastiko bandinio įtempis plyšio momentu buvo 26,48 MPa, PP plastiko – 28,38 MPa, o PE plastiko – 17,74 MPa.



2.7 pav. „QMAT Materials Testing & Analysis Software“ kompiuterine įranga gauta jėgos – pailgėjimo priklausomybės kreivė

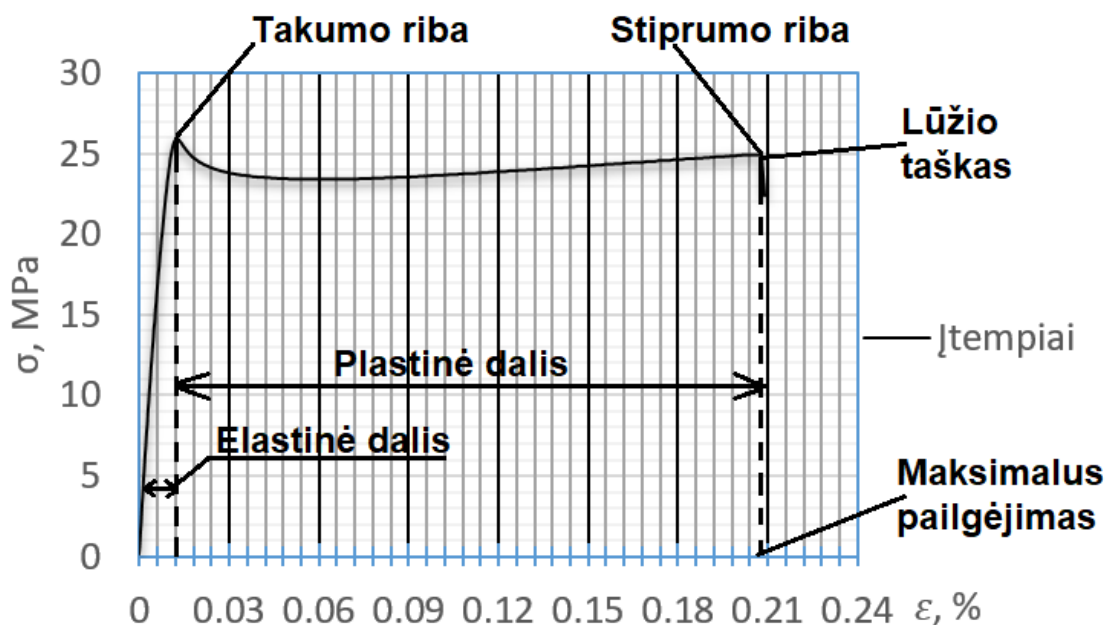


2.8 pav. ABS plastiko tempimo diagrama. Įtempių – deformacijos kreivė



Tempimo bandymas yra vienas iš populiariausių būdų apibūdinti polimero mechanines savybes. Šis bandymas matuoja medžiagos atsparumą statinei arba lėtai kintančiai jėgai. Tempimo bandymo metu gauti duomenys apibūdina daugelį mechaninių polimero savybių. 2.9 paveiksle pavaizduoti svarbiausi plastiko tempimo parametrai, ABS plastiko įtempių – deformacijos kreivė (žr. 2.9 pav.).

Pirmasis parametras, tai takumo riba, kuri nusako pradžios tašką, kurio metu bandinio skerspjūvio plotas pradeda mažėti ir susiformuoja kakliukas. Elastinė dalis, tai bandinio dalis, kurią apkrovus iki tam tikro taško ir nuėmus apkrovą bandinys grįžta į savo pradinę padėtį. Plastinė dalis, tai kai bandinys yra apkraunamas vis didesne jėga, t. y. zona virš takumo ribos. Stiprumo riba, tai didžiausia apkrova, kurią medžiaga gali atlaikyti prieš nutrūkstant. Maksimalus pailgėjimas, tai maksimalus pailgėjimas prieš nutrūkstant bandiniui [22].



2.9 pav. ABS plastiko tempimo diagrama. Įtempių – deformacijos kreivė

Plastiko PP, PE ir ABS tempimo bandymo rezultatai pavaizduoti 2.6, 2.7 ir 2.8 lentelėse.

2.6 lentelė. PP plastiko tempimo bandymo rezultatai

Bandymo numeris	Medžiaga	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Didžiausia jėga lūžio metu, N	Maksimalus pailgėjimas, mm
1	PP	6000	20	14,21	416	3,18
2	PP	6000	30	21,89	569	3,83
3	PP	6000	40	16,49	368	3,34
4	PP	7000	20	26,31	684	4,58
5	PP	7000	30	23,12	521	4,02
6	PP	7000	40	19,87	457	3,64



**2.7 lentelė. PE plastiko tempimo bandymo rezultatai**

Bandymo numeris	Medžiaga	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Didžiausia jėga lūžio metu, N	Maksimalus pailgėjimas, mm
1	PE	5000	20	1,41	36,8	3,48
2	PE	5000	30	2,82	125	9,7
3	PE	5000	40	2,08	105	4,42
4	PE	6000	20	2,92	216	4,42
5	PE	6000	30	2,86	74,3	6,42
6	PE	6000	40	2,68	70	8,3

**2.8 lentelė. ABS plastiko tempimo bandymo rezultatai**

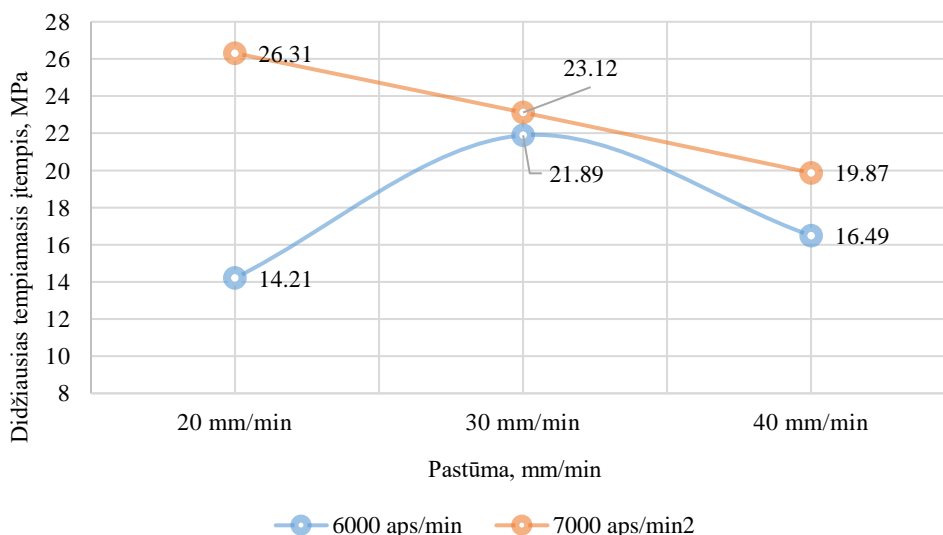
Bandymo numeris	Medžiaga	Sukimosi dažnis, aps/min	Suvirinimo pastūma, mm/min	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Didžiausia jėga lūžio metu, N	Maksimalus pailgėjimas, mm
1	ABS	2000	10	25,28	683	4,23
2	ABS	2500	10	23,39	608	4,58
3	ABS	3000	10	24,59	665	3,82
4	ABS	3500	10	18,13	471	3,26
5	ABS	2000	20	22,21	578	6,21
6	ABS	2500	20	25,30	658	4,51
7	ABS	3000	20	20,39	530	3,12
8	ABS	3500	20	25,19	681	4,69
9	ABS	2000	30	18,98	505	4,12
10	ABS	2500	30	22,82	593	4,23
11	ABS	3000	30	18,85	490	3,22
12	ABS	3500	30	23,29	554	4,25
13	ABS	2000	40	14,63	380	3,39
14	ABS	2500	40	18,23	474	2,84
15	ABS	3000	40	17,06	313	2,31
16	ABS	3500	40	21,81	567	3,36
17	ABS	4500	40	18,75	487	3,59
18	ABS	2500	60	8,09	210	2,51
19	ABS	5000	60	13,34	346	2,28

Atlikti tempimo bandymai leido surasti kiekvieno tiriamo, frikciniu maišymo būdu suvirinto plastiko, maksimalius tempiamuosius įtempius plyšio momentu, maksimalią jėgą plyšio momentu ir maksimalų pailgėjimą. Atlikus literatūros analizę, buvo pastebėta, kad vertinant siūlės stiprumą yra naudojami maksimalūs tempiamieji įtempiai plyšio momentu. Iš gautų rezultatų matyti, kad atliktuose bandymuose didžiausius įtempius atlaikė PP plastikas – 26,31 MPa., o mažiausius – PE plastikas – 1,41 MPa.

**2.5.1 PP plastiko rezultatai**

PP plastiko tempimo bandymai parodo, kad suvirinant šį plastiką, galima išgauti net 93 % siūlės stiprumą, lyginant su nesuvirintu PP plastiką. Tai buvo pasiekta naudojant 7000 aps/min greitį ir 20 mm/min pastūmą. Plastiko suvirinimo siūlės stiprumo grafike (žr. 2.10 pav.), galima matyti, kad

įrankiui sukantis 7000 aps/min greičiu, didinant pastūmą suvirinimo siūlės stiprumas tolygiai mažėjo. Esant 6000 aps/min ir 20 mm/min suvirinimo pastūmai, gaunama silpniausia siūlė iš visų šešių bandymų. Tai galėjo įvykti dėl nepakankamos šilumos susidarymo suvirinimo zonoje, nes toliau didinant pastūmą, suvirinimo siūlės stiprumas didėjo.



**2.10 pav.** PP plastiko suvirintos siūlės didžiausio tempiamojo įtempio priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio

Tempimo bandymo rezultatai buvo naudojami, norint gauti siūlės stiprumo duomenis, kad juos būtų galima patikrinti ir palyginti su nesuvirintais PP plastiko bandinių rezultatais. Rezultatai parodė, jog siūlės stiprumas pasirenkant tinkamus suvirinimo parametrus išliko labai didelis – 93 %. Silpniausia suvirinimo siūlė buvo gauta atliekant 1 bandymą, siūlės stiprumas buvo 50 %.

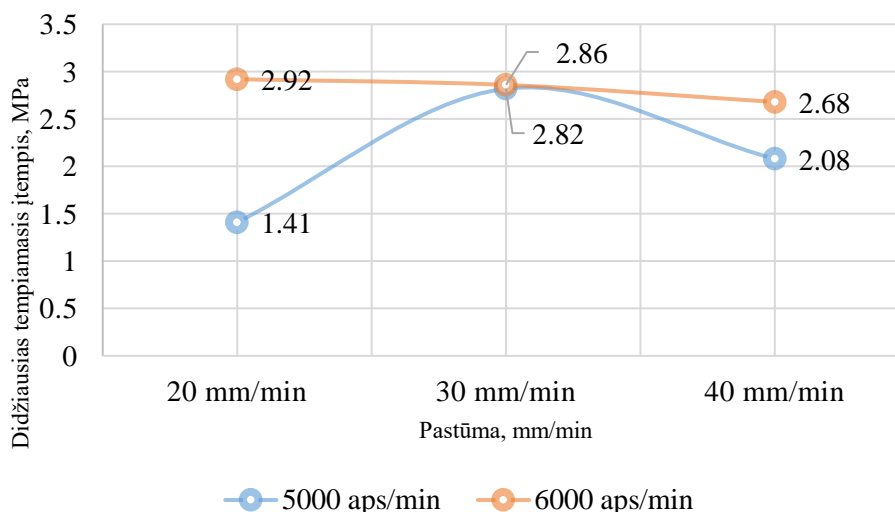
**2.9 lentelė.** Frikciniu maišymo būdu suvirintos PP plastiko siūlės palyginimas su nesuvirinta medžiaga

Medžiaga	Nesuvirinta medžiaga	Frikcinio maišymo suvirinimo rezultatai		
	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Bandymo numeris	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Suvirintos jungties palyginimas su nesuvirinta medžiaga, %
PP	28,38	1.	14,21	50
		2.	21,89	77
		3.	16,49	58
		4.	26,31	93
		5.	23,12	82
		6.	19,87	70

### 2.5.2 PE plastiko rezultatai

Suvirinant PE plastiko plokšteles, buvo gautos pačios silpniausios jungtys, lyginant su ABS ir PP plastikais. Gautų jungčių stiprumas neviršija 17 %, lyginant su nesuvirintu PE plastikais, kurio didžiausias tempiamasis įtempis buvo 17,74 MPa, o suvirinimo metu gautos jungties didžiausias įtempis tik 2,92 MPa. Nors PE plastiko suvirinimo siūlės stiprumo priklausomybės nuo suvirinimo pastūmos greičio

(žr. 2.11 pav.) grafikas atrodo panašiai, kaip ir PP plastiko, tačiau dėl gautų silpnų jungčių, galime teigti, kad pasirinkti suvirinimo parametrai nėra tinkami, norint gauti stiprią suvirinimo jungtį. Galima pastebėti, kad esant 5000 aps/min ir 20 mm/min pastūmai, jungties tempiamasis įtempis buvo 1,41 MPa. Didinant apsisukimų skaičių iki 6000 aps/min ir nekeičiant suvirinimo pastūmos, gaunama 2,92 MPa. Tad didinant įrankio sukimosi greitį, didėjo ir siūlės stiprumas, tačiau jis yra nepakankamas ir palyginus su kitais plastikais yra labai mažas.



**2.11 pav.** PE plastiko suvirinimo siūlės didžiausio tempiamojo įtempio priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio

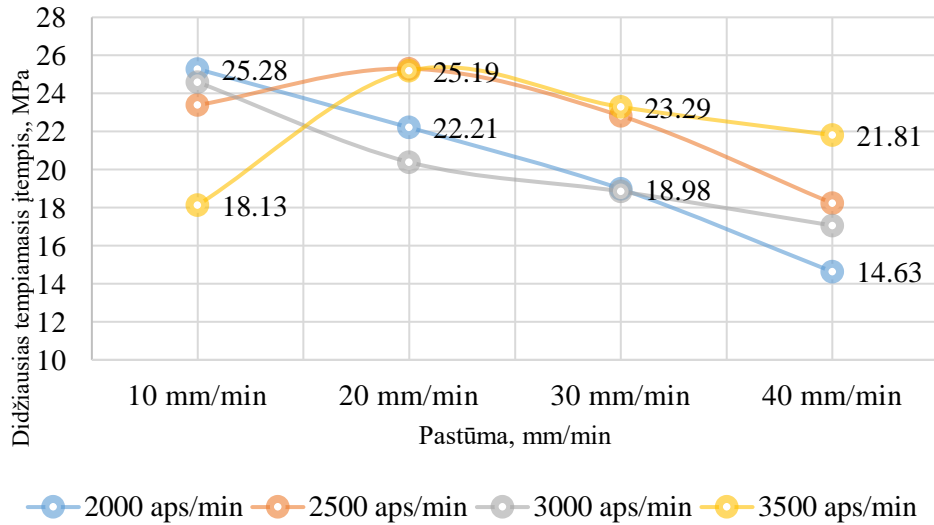
**2.10 lentelė.** Frikciniu maišymo būdu suvirintos PE plastiko siūlės palyginimas su nesuvirinta medžiaga

Medžiaga	Nesuvirinta medžiaga	Frikcinio maišymo suvirinimo rezultatai		
	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Bandymo numeris	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Suvirintos jungties palyginimas su nesuvirinta medžiaga, %
PE	17,74	1.	1,41	8
		2.	2,82	16
		3.	2,08	12
		4.	2,92	17
		5.	2,86	16
		6.	2,68	15

### 2.5.3 ABS plastiko rezultatai

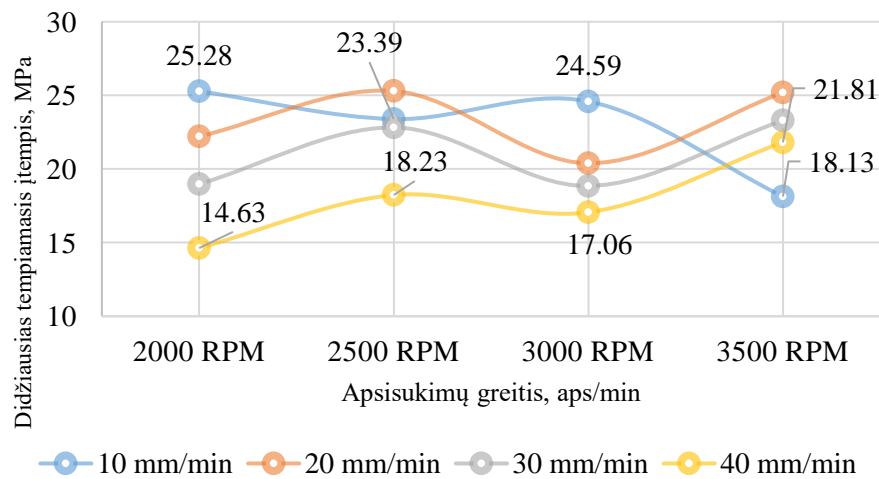
ABS plastiko, mechaninio tempimo bandymo rezultatai pavaizduoti 2.12 pav. Iš jo matyti, kad ABS suvirinimo siūlės stiprumas yra labai priklausomas nuo įrankio pastūmos greičio, bei įrankio sukimosi greičio. Kai suvirinimo pastūma buvo 10 mm/min, stipriausia jungtis gauta esant 2000 aps/min greičiui. Šios suvirintos jungties didžiausias tempiamasis įtempis buvo 25,28 MPa. Įrankiui išlaikant pastovų 2000 aps/min greitį, didinant pastūmą, siūlės jungties stiprumas mažėja. Mažiausias siūlės tempiamasis įtempis esant 2000 aps/min greičiui gautas esant 40 mm/min suvirinimo pastūmai, kuris buvo lygus 14,63 MPa. Tuo tarpu esant didžiausiam tirtam sukimosi dažniui 3500 aps/min, pasirinkus 10 mm/min

pastūmą buvo gauta viena silpniausių jungčių, kurios suvirintos siūlės didžiausias tempiamasis įtempis buvo lygus 18,13 MPa. Tačiau išlaikant 3500 aps/min, ir didinant suvirinimo greitį iki 40 mm/min, gauta stipriausia jungtis –21,81 MPa.



**2.12 pav.** ABS plastiko suvirinimo siūlės didžiausio tempiamojo įtempio priklausomybė nuo suvirinimo pastūmos greičio

Nagrinėjant suvirintos siūlės stiprumą nuo apsisukimų dažnio (žr. 2.13 pav.), galime išvelgti, kad kuo mažesnė pastūma ir didesnis įrankio sukimosi dažnis, tuo stipresnė suvirinimo siūlė buvo gauta. Verta atkreipti dėmesį į tai, kad esant dideliame pastūmos suvirinimo greičiui, proporcingai turi būti didinamas ir sukimosi dažnis, tai parodo 40 mm/min pastūmos kreivė. Esant mažam apsiukimų skaičiui 2000 aps/min, ir aukštam suvirinimo greičiui, įrankis nespėja sudaryti šildymo zonos ABS plastiko plokštelėse. Tai įrodo gautas mažas tempiamasis įtempis, tačiau tolygiai didinant apsisukimų skaičių, šis įtempis didėjo.



**2.13 pav.** ABS plastiko suvirinimo siūlės didžiausio tempiamojo įtempio priklausomybė nuo įrankio apsisukimų greičio

Tempimo bandymo rezultatai buvo naudojami, norint gauti siūlės stiprumo duomenis, kad juos būtų galima patikrinti ir palyginti su nesuvirintais ABS plastiko bandinių rezultatais. Rezultatai parodė, kad siūlės stiprumas pasirenkant tinkamus suvirinimo parametrus išliko labai didelis – 96 %. Silpniausia suvirinimo siūlė buvo gauta atliekant 18 bandymą, siūlės stiprumas buvo 31 %. Tai galėjo įvykti dėl to, kad šiam bandimui atlikti buvo naudojamas didelis suvirinimo greitis – 60 mm/min, ir mažas įrankio sukimosi dažnis, tik 2500 aps/min.

**2.11 lentelė.** Frikciniu maišymo būdu suvirintos ABS plastiko siūlės palyginimas su nesuvirinta medžiaga

Medžiaga	Nesuvirinta medžiaga	Frikcinio maišymo suvirinimo rezultatai		
		Bandymo numeris	Didžiausias tempiamasis įtempis, MPa	Suvirintos jungties palyginimas su nesuvirinta medžiaga, %
ABS	26,48	1.	25,28	95
		2.	23,39	88
		3.	24,59	92
		4.	18,13	68
		5.	22,21	84
		6.	25,30	95
		7.	20,39	77
		8.	25,19	94
		9.	18,98	72
		10.	22,82	86
		11.	18,85	71
		12.	22,29	80
		13.	14,63	55
		14.	18,23	69
		15.	17,06	64
		16.	21,81	61
		17.	18,75	71
		18.	8,09	31
		19.	13,34	51

## 2.6 Išvados

Atlikus eksperimentinius bandymus su PP, PE ir ABS plastiko plokštelėmis, buvo nustatyti kiekvieno plastiko geriausi frikcinio maišymo suvirinimo parametrai, su kuriais gaunama stipriausia jungtis. Suvirinant PP plastiką, stipriausia jungtis buvo gauta, kai suvirinimo greitis buvo 20 mm/min, o įrankio sukimosi dažnis 7000 aps/min. PE plastiko stipriausia jungtis 2,92 MPa, gauta naudojant 20 mm/min ir 6000 aps/min suvirinimo parametrus. ABS plastiko stipriausia jungtis buvo gauta suvirinant, kai pastūma 10 mm/min, o įrankio sukimosi dažnis 2000 aps/min, ir kai pastūma buvo 20 mm/min, o įrankio sukimosi greitis 2500 aps/min.

Atlikto tempimo bandymo rezultatai rodo, kad siūlės stiprumui didelę įtaką daro suvirinimo pastūma ir įrankio sukimosi dažnis. Iš pateiktų rezultatų galima teigti, kad jungties, kuri buvo suvirinama mažu pastūmos greičiu, stiprumas yra žymiai didesnis už tą, kuris suvirintas naudojant didelį suvirinimo greitį, esant tokiems pat parametrams. Palyginti mažas siūlės stiprumas gali atsirasti dėl į griovelį panašaus

defekto susidarymo. Griovelio susidarymą gali nulemti tai, kad suvirinant dideliu suvirinimo greičiu ir mažu įrankio sukimosi dažniu, įrankis nepasiekia reikiamos šilumos plokštelėse. Medžiagos trūkumas siūlėje sumažina plastiko plokštelės skerspjūvį, dėl to atliekant tempimo bandymą siūlės stiprumas buvo mažas.

### 3. Modeliavimo procesas

Palyginus su kitais metalo, plastiko sujungimo procesais, frikcinio maišymo suvirinimo procesą atlikti su tinkama įranga nėra sudėtinga. Žymiai sudėtingiau yra atlikti šio suvirinimo metodo teorinius skaičiavimus kompiuteriu. Tai įrodo ir literatūra, kurioje galime rasti įvairių eksperimentinių frikcinio suvirinimo bandymų, tačiau iš jų tik labai nedidelę dalį užima atlikti teoriniai suvirinimo skaičiavimai kompiuteriu. Tai parodo sujungimo sudėtingumą modeliuojant visą procesą kompiuteriu, kuris apjungia mechaniką, šiluminius procesus ir metalurgijos reiškinius.

Norint realistiškai sumodeliuoti frikcinio maišymo procesą kompiuteriu, reikia atkreipti dėmesį į tam tikras kylančias problemas, kurias yra sudėtinga įvertinti. Pirmoji tai yra besisukančio įrankio sukuriama šiluma, kuri suminkština medžiagą, ir palengvina maišymo procesą. Pats šilumos generavimas valdomas tam tikromis lygtimis, trinties taisyklėmis, kontaktiniu valdymu, termomechaniniu susiejimu ir ribinėmis sąlygomis. Pavyzdžiui, bandant nurodyti šilumos apsikeitimą tarp suvirinamų plokštelių ir spaustuvo, kuris tvirtai laiko plokšteles. Kita problema tai medžiagos maišymo procesas, kuris sukuria deformacijas ir kontroliuoja maišymo bei pačios siūlės kokybę. Apibendrinant, deformacijos ir medžiagos maišymas yra sunkiai skaitiškai išsprendžiamas metodas.

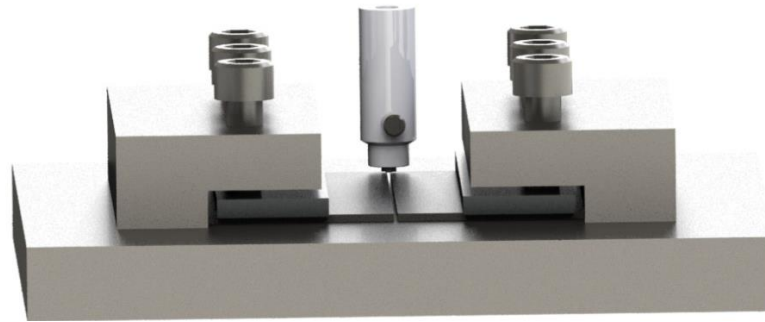
Termomechaninės problemos lygtis galima užrašyti dviem skirtingais klasikiniais būdais: Lagranžo (*Lagrange*) ir Oilerio (*Eulerian*) būdu. Lagranžo būdo vaizdavime, tinklelis yra pritvirtintas prie materialių taškų, o vaizduojant Oilerio būdu, tinklelis yra pritvirtintas prie erdvinių taškų. Taigi, vykstant medžiagos maišymui, Lagranžo tinklelis juda ir seka materialius taškus, o Oilerio tinklelis yra fiksuotas. Lagranžo būdas yra naudojamas kietoms medžiagoms, kur perdavimas yra limituotas, o tuo tarpu Oilerio būdas naudojamas skysčių mechanikoje, kur viskas yra perduodama per visus taškus. Kita problema yra teisingai nustatyti ribą tarp kietos ir skystos medžiagos, o šias ribines sąlygas nustatyti nėra lengva. Todėl norint teisingai apjungti šiuos procesus yra naudojamas hibridinis: Oilerio ir Lagranžo metodas, kuris leidžia optimizuoti procesą pasitelkiant šių abiejų metodų privalumus.

„*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ – viena iš nedaugėlio programų, kurios suteikia galimybę išspręsti skaitiniu kompiuteriniu būdu ir gauti tikslius rezultatus. Baigiamojo projekto atveju, apskaičiuojant susidariusią temperatūrą ir įtempius plastiko plokštelėse, suvirinimo metu.

#### 3.1 Modeliavimo procesas

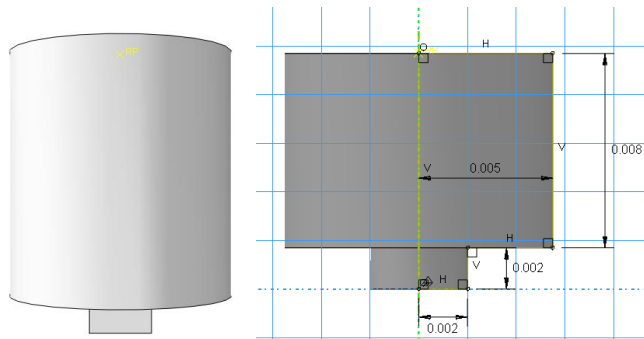
Modeliavimo tikslas – ištirti, kaip temperatūros ir įtempių pasiskirstymą plokštelėse veikia frikcinio maišymo suvirinimo parametrai: suvirinimo pastūma ir įrankio sukimosi dažnis. Toliau bus pateikta ABS plastiko modeliavimo proceso eiga ir rezultatai. Modeliavimo eiga, kraštinės sąlygos, pasirinkti plastiko ABS bandiniai ir įrankis, atitinka bandymus atliktus eksperimentinėje dalyje.

Kaip minėta anksčiau buvo pasirinkta naudoti „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ programą. Modelį sudaro deformuojamas ruošinys ir suvirinimo įrankis (žr. 3.1 pav.).



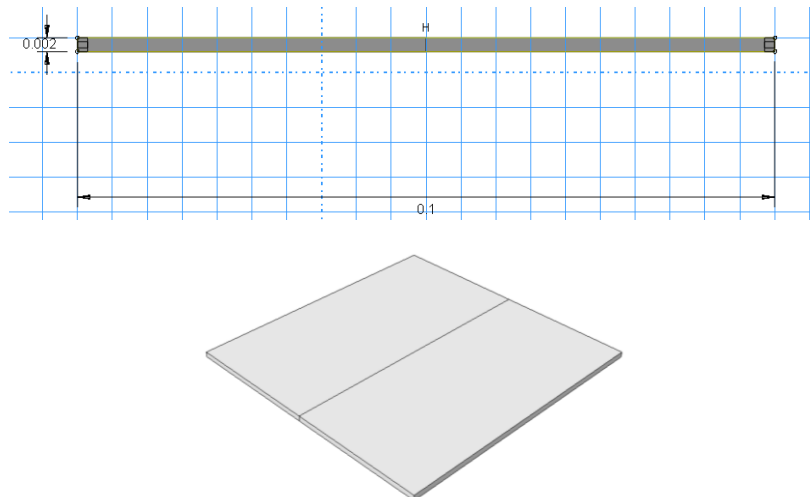
**3.1 pav.** Modelio schema

Suvirinimo įrankis yra laikomas analitiškai standžiu, pagamintu iš paprasto plieno. Įrankio kotas ir ašelė buvo sumodeliuoti tokie, kokie buvo naudoti eksperimentuose – kvadrato formos ašelė, kurios viena kraštinė 3 mm. Sumodeliuotas įrankis ir jo pagrindiniai matmenys pateikti 3.2 paveiksle.



**3.2 pav.** Naudojamas sumodeliuotas įrankis ir jo matmenys

Dvi vienodos ABS plastiko plokštelės buvo sumodeliuotos naudojant „*extrusion*“ funkciją, kurių ilgis buvo 100 mm, plotis 50 mm, o storis 2 mm.



**3.3 pav.** ABS plastiko plokštelės, kurių kiekvienos matmenys 100x50x2 mm

Sukūrus įrankį ir dvi plokšteles, sekantis žingsnis buvo įvesti medžiagos savybes tiek įrankiui, tiek plokštelėms. Modeliuojant programa „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ prie kiekvieno įvesto matmens



nepirrašo jokio matavimo vieneto, visiems parametrams reikia pasirinkti tą pačią matavimo sistemą. Modeliavimo metu buvo pasirinkta naudoti SI matavimo sistemą. ABS plastiko plokštelių ir iš plieno pagaminto įrankio medžiagų savybės nurodytos programoje, pavaizduotos 3.1 ir 3.2 lentelėse. Buvo panaudotas Džonsono Kuko (*Johnson Cook*) modelis, tai yra temperatūrinis medžiagos minkštėjimas, įvertintas pagal įtempių ir deformacijos atsakus, esant įvairioms temperatūroms. Šis modelis buvo pasirinktas dėl to, kad lengvai apima įtempių, deformacijos ir temperatūros įtaką plastiko plokštelėms.

**3.1 lentelė.** ABS plastiko ir Džonsono Kuko parametrai

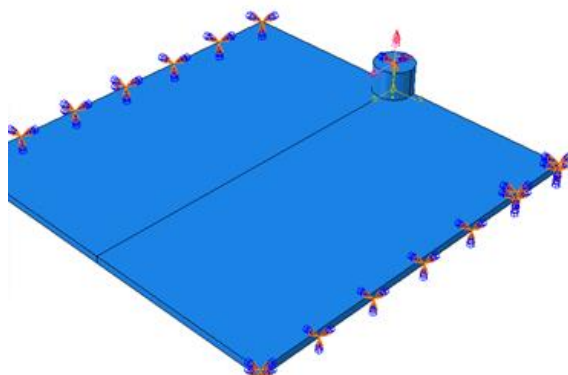
Parametras	Parameter (angl. parametras)	Matavimo vienetai	Vertė
Šiluminis laidumas	<i>Conductivity</i>	W/m°C	0,2
Tankis, $\rho$	<i>Density, \rho</i>	N/m <sup>3</sup>	1050
Jungo modulis, E	<i>Young's modulus, E</i>	MPa	260
Puasono koficientas, $\nu$	<i>Poisson's ratio, \nu</i>		0,35
Specifinė šiluma	<i>Specific heat</i>	J/(kg°C)	1050
<i>Johnson-Cook parametr (angl. Džonsono Kuko parametras)</i>			
Pradinis stiprumas, A	<i>Hardening parameter, A</i>	MPa	39
Kietėjimo modulis, B	<i>Hardening parameter, B</i>	MPa	48
Sukietėjimo eksponentas, n	<i>Hardening parameter, n</i>		1,5
Šiluminis minštumas, m	<i>Temperature sensitivity parameter, m</i>		0,979
Lydimosi temperatūra	<i>Melting point temperature</i>	°C	217
Perėjimo temperatūra	<i>Transition temperature</i>	°C	25

**3.2 lentelė.** Iš plieno pagaminto įrankio ir Džonsono Kuko parametrai

Parametras	Parameter (angl. parametras)	Matavimo vienetai	Vertė
Šiluminis laidumas	<i>Conductivity</i>	W/m°C	48,3
Tankis, $\rho$	<i>Density, \rho</i>	N/m <sup>3</sup>	7862
Jungo modulis, E	<i>Young's modulus, E</i>	MPa	200
Puasono koficientas, $\nu$	<i>Poisson's ratio, \nu</i>		0,3
Specifinė šiluma	<i>Specific heat</i>	J/(kg°C)	420
<i>Johnson-Cook parameter (angl. Džonsono Kuko parametras)</i>			
Pradinis stiprumas, A	<i>Hardening parameter, A</i>	MPa	100
Kietėjimo modulis, B	<i>Hardening parameter, B</i>	MPa	175
Sukietėjimo eksponentas, n	<i>Hardening parameter, n</i>		0,36
Šiluminis minštumas, m	<i>Temperature sensitivity parameter, m</i>		1
Lydimosi temperatūra	<i>Melting point temperature</i>	°C	1525
Perėjimo temperatūra	<i>Transition temperature</i>	°C	25

Kitas žingsnis buvo sudaryti junginį, užsiduoti kraštines sąlygas. Plokštelės įtvirtinamos iš šonų, kaip ir tikrame eksperimente. Įrankiui suteikiamas linijinis ir sukimosi greitis, kuris atitinka tikrus greičius, naudotus realiame eksperimente. Funkcijoje „*assembly*” teisingai naudojant ryšius, sumodeliuojamas jau į suvirinimo procesą panašus procesas. Modeliuoti buvo pasirinkta naudojant vieną žingsnį (*step*), nes norimi gauti rezultatai buvo temperatūros, įtempių pasiskirstymas plastiko ABS plokštelėse, o tam didelės įtakos įrankio įsigilinimas neturi. Tad buvo pasirinkta modeliuoti taip, kad įrankis iš karto būtų įsigilinęs ir judėtų kryptimi, kuria bus sudaroma suvirinimo siūlė.

Suformavus teisingą junginį, naudojant programos funkciją „*assembly*”, plastiko plokštelės buvo įtvirtintos iš šonų, kaip ir bandymuose, kai plastiko plokštelės buvo įtvirtintos laikiklyje (žr. 3.4 pav.).



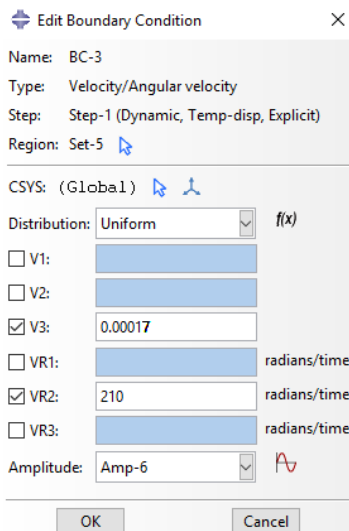
3.4 pav. Sudarytas junginys, plastiko plokštelių įtvirtinimas šonuose

Sudarius modelio junginį „*assembly*”, buvo užduotas įrankio sukimosi dažnis ir suvirinimo pastūma. Duomenys buvo pasirinkti tokie pat, kaip ir bandymuose, suvirinant ABS plastiką, kurio duomenys pateikti 2.3 lentelėje. Visi reikiami duomenys buvo paversti į „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ programos skaičiavimams reikalingus vienetus. Pavyzdžiui, pirmojo realaus plokštelių suvirinimo bandymo atveju pasirinktas apsisukimų skaičius per minutę buvo 2000 aps/min, programoje „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ buvo pakeistas į 210 rad/s sukimosi greitį. Ta pati procedūra buvo atlikta su suvirinimo pastūma: pirmojo bandymo atveju suvirinimo pastūma buvo 10 mm/min, o „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ programoje šis dydis buvo pakeistas į 0,000167 m/s greitį. Visi pakeisti parametrai nurodyti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Modeliavimo pagrindiniai parametrai ir seka.

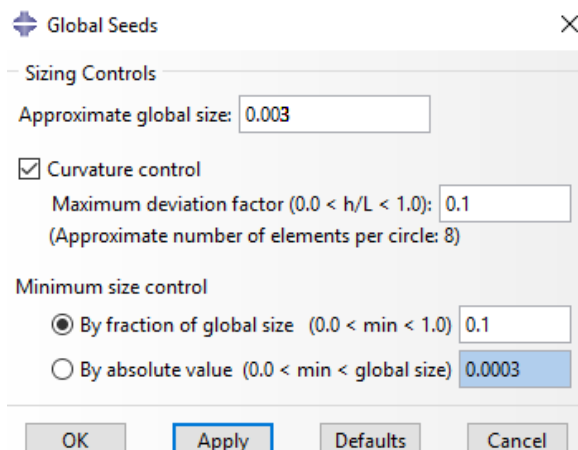
Nr.	Sukimosi dažnis, rad/s	Įrankio pastūma, m/s	„Dwell time“, s	Įrankio ašelės „pin“ forma
1.	210	$1.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
2.	262	$1.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
3.	314	$1.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
4.	367	$1.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
5.	210	$3.3 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
6.	262	$3.3 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
7.	314	$3.3 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
8.	367	$3.3 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
9.	210	$5 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
10.	262	$5 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
11.	314	$5 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
12.	367	$5 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
13.	210	$6.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
14.	262	$6.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
15.	314	$6.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
16.	367	$6.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
17.	471	$6.7 \cdot 10^{-4}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
18.	262	$1 \cdot 10^{-3}$	15	3mm kvadrato formos ašelė
19.	524	$1 \cdot 10^{-3}$	15	3mm kvadrato formos ašelė

Šie apskaičiuoti duomenys suvedami į programos “*velocity/angular velocity*” lentelę (žr. 3.5 pav.), kur V1 – įrankio judėjimo greitis X ašyje, V2 – įrankio judėjimo greitis Y ašyje, V3 – greitis Z ašyje, VR1 – sukimosi greitis apie X ašį, VR2 – sukimosi greitis apie Y ašį, VR3 – sukimosi greitis apie Z ašį. Atliekant pirmąjį bandymą buvo reikalinga, kad įrankis judėtų Z ašies kryptimi pastoviu 0,00017 m/s greičiu, ir suktusi apie Y ašį 210 rad/s greičiu.

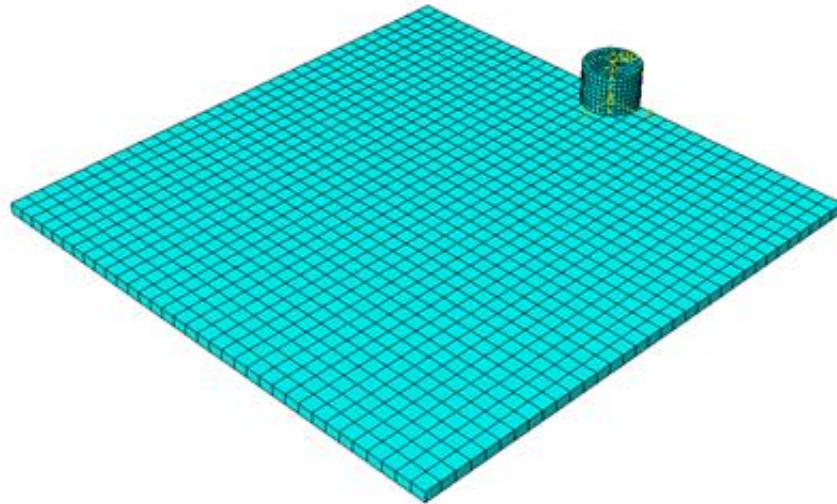


**3.5 pav.** Įvestos kraštinės sąlygos – įrankio judėjimo greitis ir įrankio sukimosi dažnis

Vėliau buvo pasirinktas baigtinių elementų tinklelis. Modeliuojant buvo atsižvelgta į programos rezultatų sprendimo laiką, todėl tinklelis buvo retintas bei pasirinktas toks, kuris išlaikytų modelio tikslumą. Nuspręsta gauti tiksliausius įmanomus rezultatus, per mažiausią skaičiavimo laiką. Pasirinktas optimalus tinkelio dydis 0,003 mm (žr. 3.6 pav.). ABS plastiko plokštelėse sudaromas baigtinių elementų tinklelis, kuris padalija plastiko plokšteles į 1156 baigtinius elementus (žr. 3.7 pav).



**3.6 pav.** Tinklelio dydžio pasirinkimas



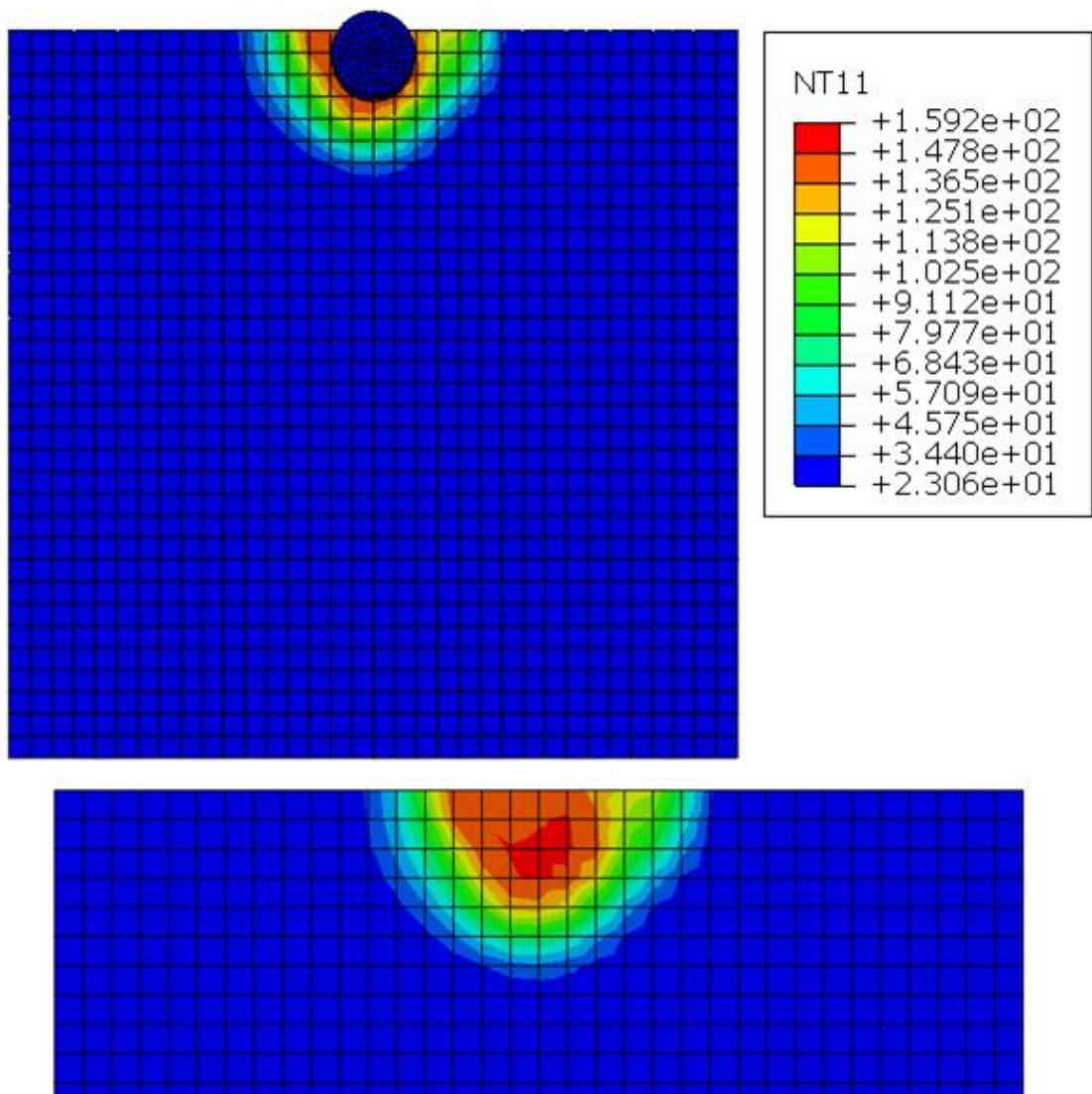
**3.7 pav.** Junginys su suformuotu baigtinių elementų tinkleliu

Baigus modeliuoti visą sistemą, programa buvo paleista modelio patikrinimui. Buvo panaudota „*data check*“ funkcija „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ programoje. Toliau buvo gauti temperatūros ir vidutinių įtempių „*von Mises*“ pasiskirstymo rezultatai plastiko plokštelėse. Skaitinio modeliavimo tikslas buvo iširti, kaip kintant frikcinio maišymo suvirinimo parametrams, kinta temperatūra ir įtempiai ABS plastiko plokštelėse. Paleidus programos skaičiavimus buvo padaryta išvada dėl suvirinimo laiko skaičiavimo sumažinimo, todėl, kad atliekamo eksperimento atveju, jei suvirinimo greitis pasirenkamas 10mm/min, tai suvirinimo procesas trunka 600 sekundžių. Suskaičiuoti ir programoje gauti tokios trukmės proceso rezultatus užtruktų daugiau nei vieną savaitę, iš viso reiktų atlikti 19 tokių suvirinimo procesų. Dėl šios priežasties buvo priimtas sprendimas sumodeliuoti pirmas 25 frikcinio maišymo suvirinimo proceso sekundes, tai sutrumpino vieno proceso skaičiavimus iki 15 valandų.

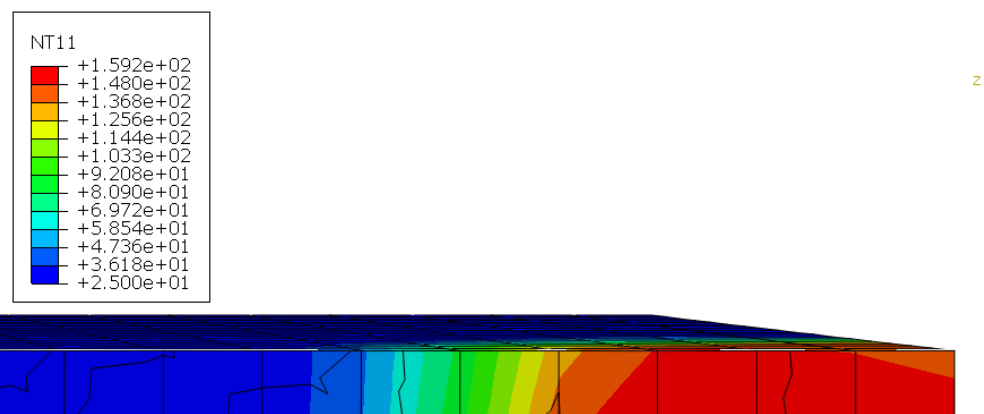
## **3.2 Rezultatai**

### **3.2.1 Temperatūrų pasiskirstymas plokštelėse**

Programa „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ sudarytas modelis numato temperatūrą per visą bandinio tūrį, viso proceso metu. 3.8 pav. pavaizduotas temperatūros pasiskirstymas celcijaus laipsniais, 5 suvirinimo sekundę. Suvirinimo procesas greitai pasiekė pastovią būseną ir temperatūros pasiskirstymą. ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo procesas, pirmojo bandymo atveju pavaizduotas 3.8 paveiksle, kai suvirinimo pastūma buvo 10 mm/min, o įrankio sukimosi dažnis 2000 aps/min. 3.9 paveiksle pavaizduotas suvirintos ABS plokštelės išilginis pjūvis.



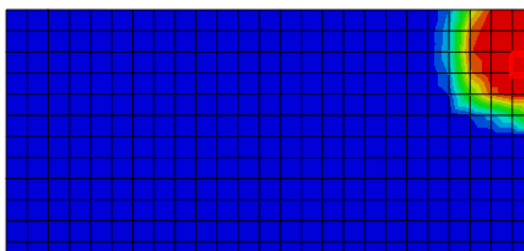
**3.8 pav.** Fricinio maišymo suvirinimo pirmojo bandymo temperatūrų (°C) pasiskirstymas, ABS plastiko plokštelėse, 5 suvirinimo sekundę



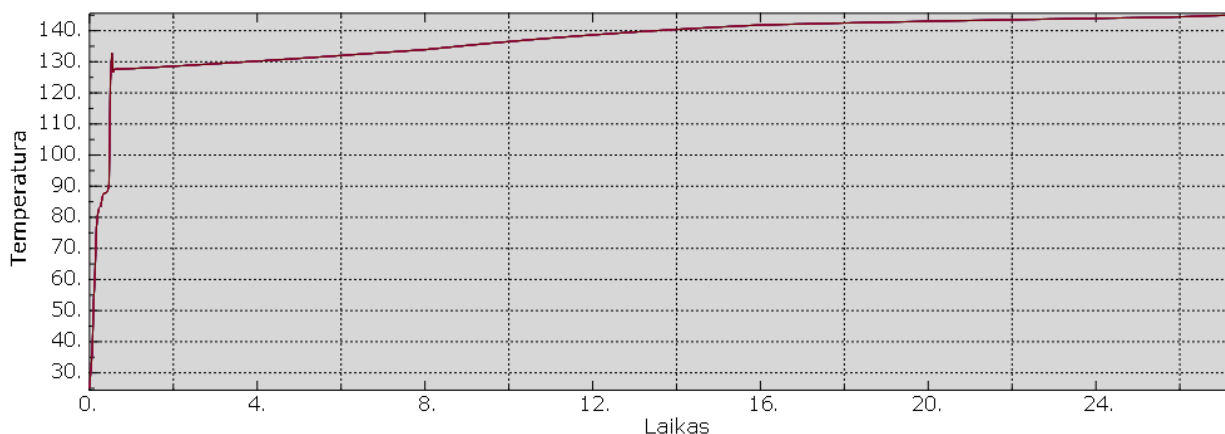
**3.9 pav.** Fricinio maišymo suvirinimo temperatūrų (°C) pasiskirstymas ABS plokštelėje (pavaizduotas plokštelės išilginis pjūvis)



Paleidus sumodeliuotą frikcinio maišymo suvirinimo procesą programoje „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“, rezultatai parodė maksimalią temperatūrą, bet kurioje plokštelių vietoje. Norint gauti tikslesnius rezultatus buvo pasirinkta naudoti ne vien maksimalius temperatūros rodmenis, tačiau ir kiekvieno proceso metu, buvo pasirinktas tam tikras elementas iš visų baigtinių elementų. Tas pats elementas buvo pasirenkamas kiekvieno proceso metu bei buvo stebima kaip kinta jo temperatūra. 3.10 paveiksle pavaizduotas kiekvieno proceso metu pasirinktas baigtinių elementų elementas, o 3.11 pav. pavaizduotas grafikas, kaip kinta to elemento temperatūra per pirmąsias 25 suvirinimo proceso sekundes.



**3.10 pav.** Atlikus išilginį pjūvį, pasirinktas trečias elementas nuo suvirinimo pradžios taško



**3.11 pav.** Pasirinkto elemento temperatūros (°C) kitimo grafikas per pirmas 25 suvirinimo sekundes

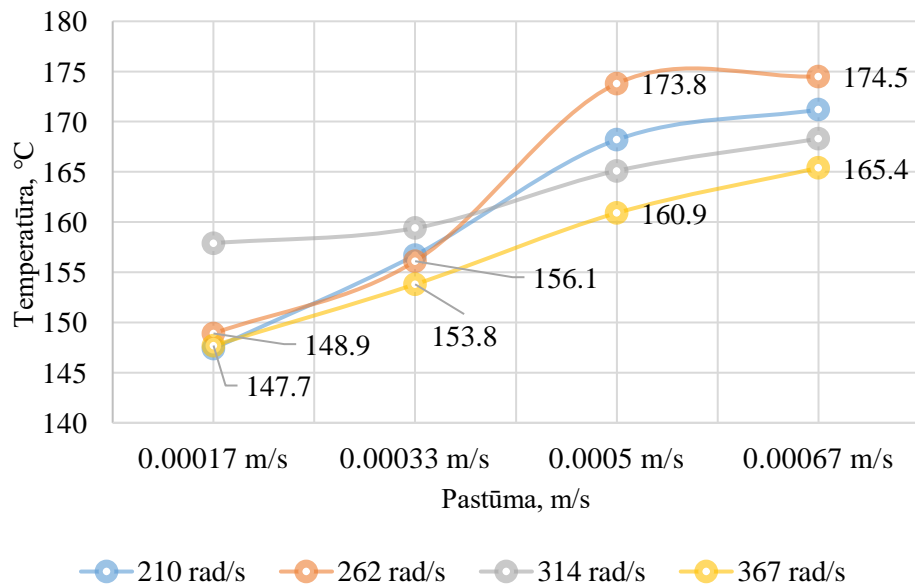
Pirmojo ABS plastiko bandymo, kurio parametrai buvo 10 mm/min ir 2000 aps/min, pasirinkto elemento temperatūros pokytis pavaizduotas 3.11 pav. Iš rezultatų matyti, kad elemento temperatūra vos prasidėjus suvirinimo procesui pakilo iki 130 °C ir vėliau tolygiai kilo tol, kol pasiekė apie 147,4 °C. Toks temperatūros pasiskirstymas yra teisingas, nes buvo neviršyta lydimosi temperatūra „*melting point*” (kuri ABS plastikui yra 217 – 237 °C) ir buvo viršyta stiklėjimo temperatūrą „*glass transition temperature*”, kuri ABS plastikui lygi 105 °C. Toliau 3.4 lentelėje surašomos gautos maksimalios temperatūros ir maksimalios temperatūros pasirinktame taške, keičiant suvirinimo parametrus.

**3.4 lentelė.** ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo temperatūrų rezultatai

Nr.	Medžiaga	Sukimosi dažnis, rad/s	Įrankio pastūma, m/s	Maksimali temperatūra plastiko plokštelėse, °C	Maksimali temperatūra pasirinktame taške, °C
1.	ABS	210	$1.7 \cdot 10^{-4}$	159,2	147,4
2.	ABS	262	$1.7 \cdot 10^{-4}$	171,1	156,7
3.	ABS	314	$1.7 \cdot 10^{-4}$	186,8	168,2

3.4 lentelė. (tęsinys)

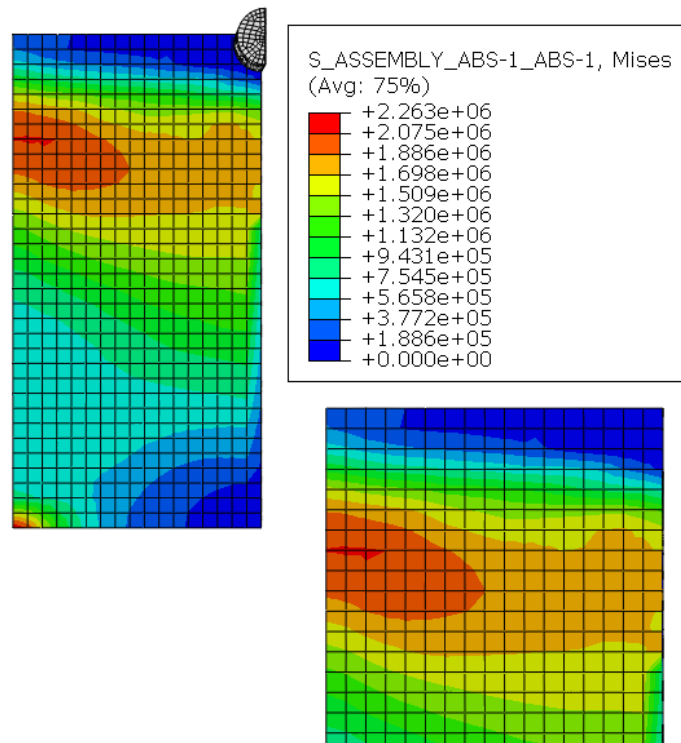
4.	ABS	367	$1.7 \cdot 10^{-4}$	189,7	171,6
5.	ABS	210	$3.3 \cdot 10^{-4}$	156,5	148,9
6.	ABS	262	$3.3 \cdot 10^{-4}$	182,0	156,1
7.	ABS	314	$3.3 \cdot 10^{-4}$	184,1	173,8
8.	ABS	367	$3.3 \cdot 10^{-4}$	185,2	174,5
9.	ABS	210	$5 \cdot 10^{-4}$	159,1	157,9
10.	ABS	262	$5 \cdot 10^{-4}$	183,5	159,4
11.	ABS	314	$5 \cdot 10^{-4}$	206,5	165,1
12.	ABS	367	$5 \cdot 10^{-4}$	174,0	168,3
13.	ABS	210	$6.7 \cdot 10^{-4}$	148,5	147,7
14.	ABS	262	$6.7 \cdot 10^{-4}$	154,0	153,8
15.	ABS	314	$6.7 \cdot 10^{-4}$	166,5	160,9
16.	ABS	367	$6.7 \cdot 10^{-4}$	173,6	165,4
17.	ABS	471	$6.7 \cdot 10^{-4}$	171,8	162,7



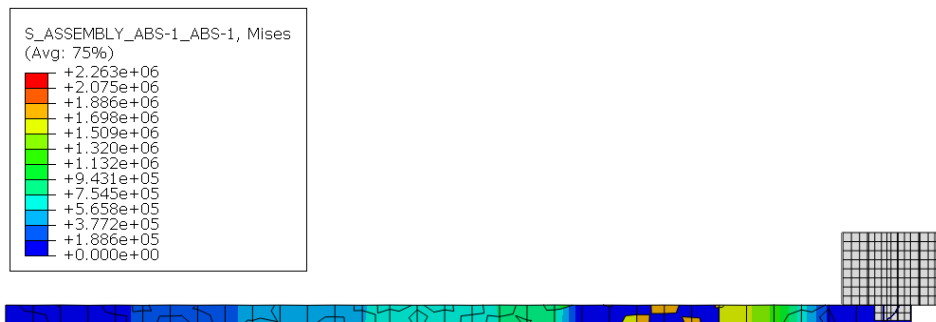
3.12 pav. ABS plastiko modeliavimo metu gautas temperatūrų nuo suvirinimo parametrų pasiskirstymas

### 3.2.2 Įtempių pasiskirstymas plokštelėse

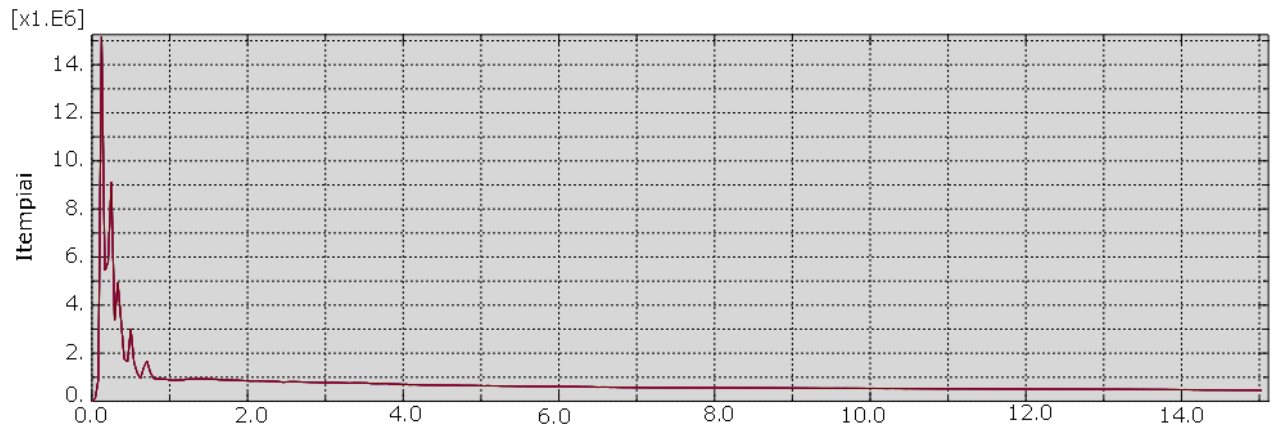
Taip pat, viena iš svarbiausių modelio savybių yra galimybė numatyti įtempių pasiskirstymą visame frikcinio maišymo suvirinimo procese. 3.13 paveiksle pavaizduoti pirmojo bandymo „von Mises” įtempių grafikai 5 suvirinimo sekundę, skaičiuojant nuo proceso pradžios. Išigilinus ašelei „pin” į plokšteles, galime pamatyti, kad įtempio vertė plokštelėse po įrankio kotu „shoulder” priartėja prie nulio. Prisilietus įrankiui prie plokštelių, įtempiai palaipsniui išnyko, nes medžiagą veikė šiluma, susidariusi prie koto „shoulder” (žr. 3.5 lentelę). Didžioji dalis medžiagos po įrankiu buvo suminkštėjusi, kad būtų galima pasiekti lengvą maišymą.



**3.13 pav.** Frikcinio maišymo suvirinimo pirmo bandymo „von Mises” įtempių pasiskirstymas, ABS plastiko plokštelėse, 5 suvirinimo sekundę



**3.14 pav.** Frikcinio maišymo suvirinimo įtempių pasiskirstymas ABS plokštelėje (išilginis plokštelės pjūvis)



**3.15 pav.** Pasirinkto elemento „von Mises” įtempių kitimo grafikas per pirmąsias 25 suvirinimo sekundes



3.5 lentelėje surašomi gauti maksimalūs įtempiai ir maksimalus įtempis pasirinktame taške, keičiant suvirinimo parametrus.

**3.5 lentelė.** ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo įtempių rezultatai

Nr.	Medžiaga	Sukimosi dažnis, rad/s	Įrankio pastūma, m/s	Maksimalūs įtempiai plokštelėse, MPa	Maksimalūs įtempiai pasirinktame taške, MPa
1.	ABS	210	$1.7 \cdot 10^{-4}$	2,26	0,56
2.	ABS	262	$1.7 \cdot 10^{-4}$	2,42	0,63
3.	ABS	314	$1.7 \cdot 10^{-4}$	2,34	1,14
4.	ABS	367	$1.7 \cdot 10^{-4}$	2,41	1,58
5.	ABS	210	$3.3 \cdot 10^{-4}$	2,65	1,87
6.	ABS	262	$3.3 \cdot 10^{-4}$	2,87	2,32
7.	ABS	314	$3.3 \cdot 10^{-4}$	2,99	2,67
8.	ABS	367	$3.3 \cdot 10^{-4}$	3,42	2,54
9.	ABS	210	$5 \cdot 10^{-4}$	2,08	1,43
10.	ABS	262	$5 \cdot 10^{-4}$	2,57	1,93
11.	ABS	314	$5 \cdot 10^{-4}$	2,48	1,89
12.	ABS	367	$5 \cdot 10^{-4}$	2,94	1,47
13.	ABS	210	$6.7 \cdot 10^{-4}$	2,56	1,12
14.	ABS	262	$6.7 \cdot 10^{-4}$	2,77	1,43
15.	ABS	314	$6.7 \cdot 10^{-4}$	2,27	1,62
16.	ABS	367	$6.7 \cdot 10^{-4}$	2,42	1,35
17.	ABS	471	$6.7 \cdot 10^{-4}$	2,12	1,46

Sumodeliavus įtempių skaičiavimo modelį nustatytas įtempių zonų susidarymas aplink įrankį per pirmąsias suvirinimo sekundes, vėliau po įrankiu esančios zonos įtempiai pradeda mažėti iki 2 MPa. Praėjus 10 sekundžių nebuvo pastebėti jokie akivaizdūs įtempių pokyčiai aplink įrankį. Analizuojant įtempių kitimą viso proceso metu nustatyta, kad temperatūra daro didelę įtaką įtempių deformavimuisi. Pirmąsias suvirinimo sekundes plokštelės tik patiria didelius momentinius įtempius, tačiau įrankiui lydant plastiką, šie įtempiai mažėja.

### 3.2.3 Išvados

Naudojant „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*“ programą buvo sumodeliuotas frikcinio maišymo suvirinimo procesas su ABS plastiko plokštelėmis. Programa įvertino plokštelėms tenkančias deformacijas ir temperatūros pasiskirstymą suvirinimo metu. Modeliavimo tikslas buvo ištirti kaip suvirinimo prametrai – suvirinimo pastūma ir įrankio sukimosi dažnis, veikia temperatūros ir įtempių pasiskirstymą plokštelėse.

Buvo įvertintas ir stebėtas temperatūros zonos susidarymas plokštelėse, keičiant suvirinimo parametrus. Pastebėta, kad kuo didesnis suvirinimo greitis ir įrankio sukimosi dažnis, tuo didesnės temperatūros susidaro aplink įrankį esančioje suvirinimo zonoje. Visos ABS frikcinio maišymo suvirinimo sumodeliuoto proceso temperatūros neviršijo ABS lydimosi temperatūros „*melting point*“, kuri yra 217 – 237 °C, ir viršijo stiklėjimo temperatūrą „*glass transition temperature*“, kuri yra 105 °C. Atliekant eksperimentus, stipriausios jungtys buvo gautos pirmuose bandymuose. Pagal gautus rezultatus galima

teigti, kad ABS plastikui reikia viršyti stiklėjimo temperatūrą, bet nereikia pasiekti lydimosi temperatūros. Maišant besilydantį plastiką aukštesnė temperatūra pakeičia plastiko mikrostruktūrą, t.y., plastikas susilpnėja ir atliekant frikcinį maišymo suvirinimą gaunama silpnesnė siūlė.

Taip pat buvo įvertintas įtempių susidarymas plokštelėse. Nustatyta, kad didžiausius įtempius plokštelės patiria per pirmąsias suvirinimo sekundes, tačiau einant laikui ABS plastikas lydosi, minkštėja, tuo pačiu mažėja ir įtempiai. Visų suvirinimo proceso įtempiai nebuvo dideli. Atliekant tempimo bandymus sveikam bandiniui reikėjo 26,48 MPa jėgos įtempio, kad plastikas plyštų. Modeliavimo atveju įtempiai proceso metu buvo 2 MPa, tai sudaro tik 3,7 % įtempių, lyginant su tempimo bandymu.

#### 4. Statistinė analizė (ANOVA)

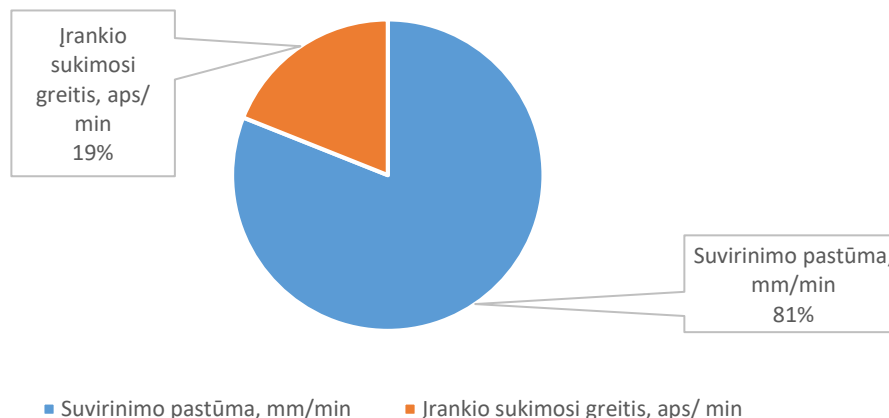
ANOVA – yra statistinis metodas, naudojamas patikrinti, kaip dviejų ar daugiau grupių vidurkiai skiriasi vienas nuo kito. Ši statistinė analizė patikrina vieno ar daugiau veiksnių poveikį ir reikšmingumą procesui. Variacijos analizė dažnai yra naudojama psichologijoje, medicinoje, ekonomikoje. Norint atlikti šią statistinę analizę, turi būti bent vienas faktorius ir bent keli jo lygiai. Šiame ANOVA tyrime tikslas buvo statistiškai ištirti reikšmingiausius suvirinimo proceso parametrus – įrankio sukimosi greitį ir suvirinimo pastumą. Analizės metu nustatoma, kuris iš šių parametrų yra reikšmingiausias suvirinimo procese.

Atliekant statistinę analizę ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo faktoriai – suvirinimo pastūma ir įrankio sukimosi greitis. Kiekvienas faktorius yra sudarytas iš keturių lygių. Pastūmos lygiai buvo 10 mm/min, 20 mm/min, 30 mm/min ir 40 mm/min. Įrankio sukimosi greičio lygiai buvo 2000 aps/min, 2500 aps/min, 3000 aps/min ir 3500 aps/min. ANOVA analizė buvo atlikta naudojant „Minitab“ programinę įrangą. Į programą surašius faktorius ir jų lygius gaunami rezultatai. 4.1 lentelė rodo ABS plastiko ANOVA statistinės analizės rezultatus. Didesnis procentas reiškia, kad suvirinimo parametras turi didesnę įtaką suvirinimo siūlės stiprumui. Remiantis gautais rezultatais svarbiausias parametras stipriam sujungimui yra suvirinimo pastūma su 81,04 %, o įrankio apsisukimų dažnis turi mažesnę svarbą suvirinimo stiprumui – 18,96 %.

4.1 lentelė. ABS plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai

Parametras	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	Svarba, %	Parametrų svarba, %
Įrankio sukimosi dažnis, aps/min	3	16,57	5,522	0,65	0,601	10,13	18,96
Suvirinimo pastūma, mm/min	3	70,87	23,624	2,79	0,102	43,31	81,04
Error	9	76,21	8,468			46,56	
Iš viso	15	163,65				100	100

Čia: DF – laisvės laipsnis; Adj SS – kvadratų suma; Adj MS – kvadratų vidurkis; F- „Fisher“ kriterijus; P – tikimybė, viršijanti 95 % pasiklojimo lygį.

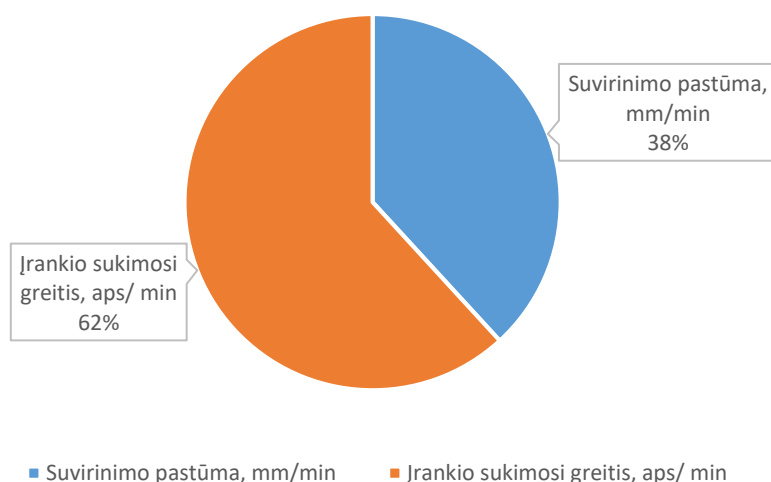


4.1 pav. ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrų svarba suvirinimo siūlės stiprumui

Gauti rezultatai atlikus ANOVA statistinę analizę PE plastikui rodo, kad suvirinimo stiprumas labiausiai priklauso nuo įrankio sukimosi dažnio 61,82%, o įrankio pastūma sudaro tik 38,18 % svarbą suvirinimo siūlės stiprumui (žr. 4.2 pav.).

4.2 lentelė. PE plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai

Parametras	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	Svarba, %	Parametro svarba, %
Įrankio sukimosi dažnis, aps/min	1	0,7704	0,7704	2,80	0,236	42,88	61,82
Suvirinimo pastūma, mm/min	2	0,4756	0,2378	0,86	0,536	26,49	38,18
Error	2	0,5504	0,2752			30,63	
Iš viso	5	1,7965				100	100

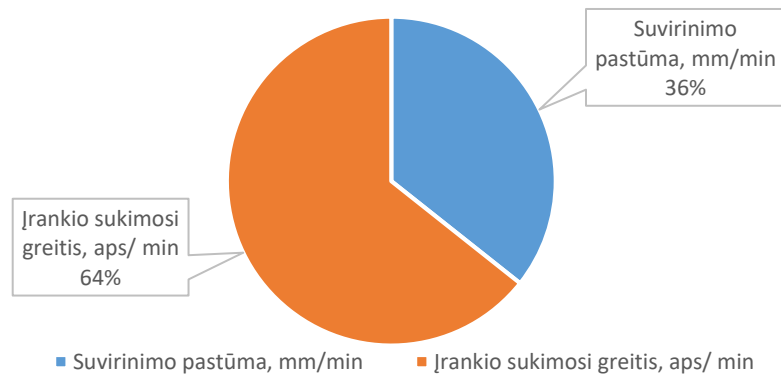


4.2 pav. PE plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametų svarba suvirinimo siūlės stiprumui

PP plastikui, suvirinimo siūlės stiprumas priklauso 64,33 % nuo įrankio apsisukimų greičio ir 35,67 % nuo suvirinimo pastūmos (žr. 4.3 pav.).

4.3 lentelė. PP plastiko variacijos analizės (ANOVA) rezultatai

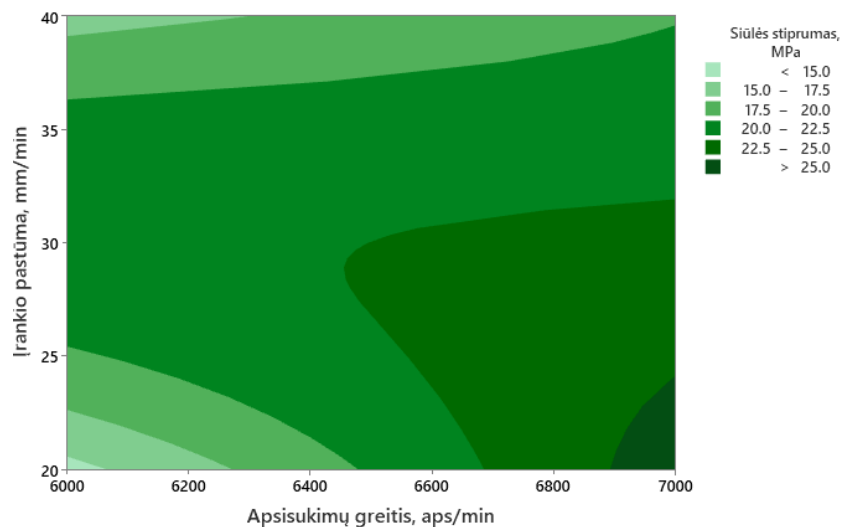
Parametras	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	Svarba, %	Parametro svarba, %
Įrankio sukimosi dažnis, aps/min	1	46,54	46,537	2,81	0,236	47,30	64,33
Suvirinimo pastūma, mm/min	2	18,71	9,357	0,56	0,639	19,02	35,67
Error	2	33,14	16,568			33,68	
Iš viso	5	98,39				100	100



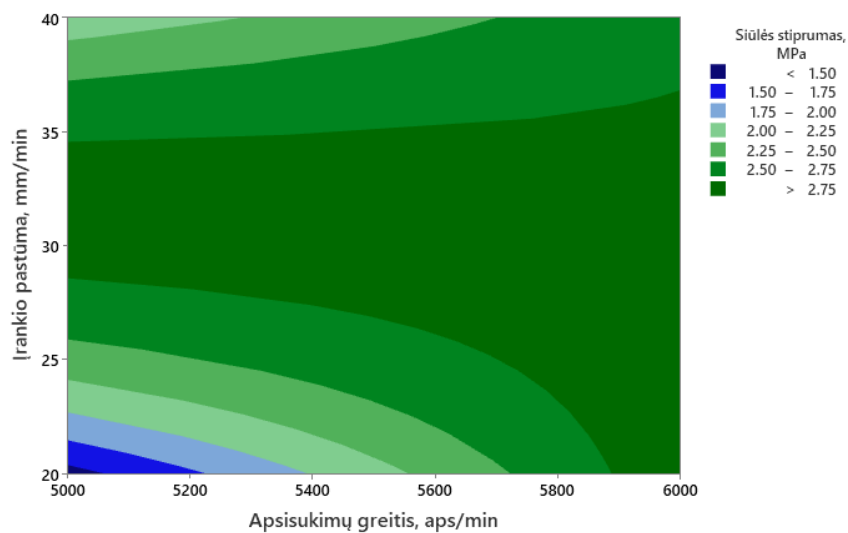
**4.3 pav.** PP plastiko frikcinio maišymo suvirinimo parametrų svarba suvirinimo siūlės stiprumui

Pagal gautus rezultatus nustatyta, kad PE ir PP plastikui didesnę įtaką (65 %) suvirinimo siūlės stiprumui daro įrankio sukimosi greitis, o ABS plastikui didesnę įtaką daro suvirinimo pastūma (81,04 %). Rezultatai galėjo skirtis dėl to, kad atliekant bandymus su ABS plastikui, iš viso buvo atlikta 19 bandymų, o PE ir PP plastiko tik po 6 bandymus, dėl to esant didesniai DF laisvės laipsnių skaičiui, gaunami ir tikslesni rezultatai.

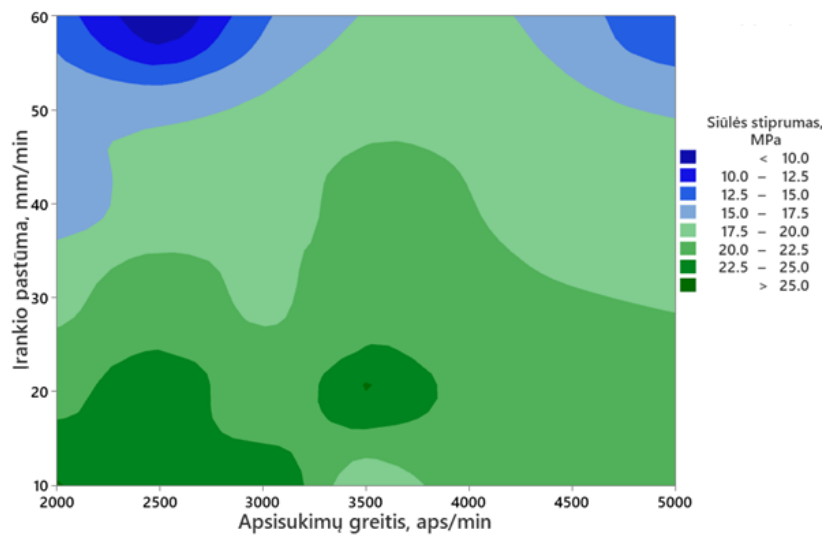
Taip pat naudojant „Minitab“ programinę įrangą, buvo ištirtas santykis tarp atsako ir dviejų pasirinktų kintamųjų, naudojant „contour“ grafiką. Kontūro „contour“ grafike dviejų kintamųjų reikšmės buvo vaizduojamos X ir Y ašyse, o atsako vertės buvo pavaizduotos šešėlinėmis sritimis, vadinamomis kontūrais. Šiame grafike aiškiai matomi tinkami režimai norint suvirinti ir gauti stiprią suvirinimo jungtį. Visuose gautuose grafikuose, tamsesnėse srityse yra pažymėtos vietos, su kuriais parametrais gaunamos stiprios suvirinimo siūlės, o šviesesnėse vietose – silpnesnės suvirinimo siūlės. Vietose, pažymėtose mėlynai, gaunamos silpniausios eksperimento metu gautos jungtys. Kontūro grafikai leidžia lengviau pastebėti ir pasirinkti tinkamus suvirinimo režimus.



**4.4 pav.** PP plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas



**4.5 pav.** PE plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas



**4.6 pav.** ABS plastiko siūlės stiprumo pasiskirstymas

## Išvados

1. Atlikus literatūros analizę buvo susipažinta su pagrindiniais plastiko suvirinimo būdais: ultragarsiniu suvirinimu, vibraciniu suvirinimu, frikciniu maišymo suvirinimu ir indukcinio plastiko suvirinimu. Buvo aptarta, kad plastikas pasižymi geru jėgos ir svorio santykiu, atsparumu ir maža kaina, todėl jis yra paplitęs ir naudojamas įvairiose pramonės šakose: statybos, chemijos ir automobilių pramonėse. Frikcinio maišymo suvirinimo būdo pranašumai yra paprastumas ir efektyvumas, naudojant šį suvirinimo būdą gali būti sudaromos stiprios, hermetiškos jungtys. Taip pat frikcinis suvirinimas yra laikomas vienu svarbiausių būdų sujungti plastikines dalis.
2. Eksperimentinėje dalyje buvo atlikti bandymai su ABS (akrilnitrilo butadieno stireno), PP (polipropileno) ir PE (polietileno) plastikais. Iš viso suvirintos 62 plastiko plokštelės, kurių matmenys buvo 100x50x2 mm. Atliekant eksperimentus buvo keičiami frikcinio maišymo suvirinimo parametrai – įrankio pastūmos greitis buvo keičiamas nuo 10 mm/min iki 60 mm/min, įrankio sukimosi dažnis buvo keičiamas nuo 2000 aps/min iki 7000 aps/min. Įrankis ir kiti proceso parametrai nebuvo keičiami.
3. Suvirintos jungties stiprumui įvertinti buvo atlikti tempimo bandymai su PP, PE ir ABS plastiko plokštelėmis. Nustatyti geriausi frikcinio maišymo suvirinimo parametrai, su kuriais gautos stipriausios jungtys. Stipriausios ABS plastiko stipriausios jungtys buvo gautos, kai suvirinimo pastūma buvo 10 mm/min, o įrankio sukimosi dažnis 2000 aps/min (25,28 MPa), ir kai suvirinimo pastūma buvo 20 mm/min, o sukimosi dažnis 2500 aps/min (25,30 MPa). Naudojant šiuos suvirinimo parametrus, suvirinimo siūlės stiprumas buvo 95 %, lyginant jį su nesuvirintu ABS plastiką. Suvirinant PP plastiką, stipriausia jungtis buvo gauta, kai suvirinimo greitis buvo 20 mm/min, o įrankio sukimosi dažnis 7000 aps/min (26,31 MPa), siūlės jungties stiprumas palyginus su nesuvirinta medžiaga išsilaikė 93 %. PE plastiko stipriausia jungtis (2,92 MPa), gauta naudojant 20 mm/min ir 6000 aps/min suvirinimo parametrus. PE plastiko siūlės stiprumas išlaikė 17 %. Nustatyta, kad naudojant mažą suvirinimo pastūmos greitį ir didelį įrankio sukimosi greitį, galima gauti stiprią ir kokybišką jungtį.
4. Naudojant „*Abaqus Unified FEA – SIMULIA*” programą sukurtas frikcinio maišymo suvirinimo proceso modeliavimas. Keičiant suvirinimo proceso parametrus buvo įvertintas temperatūros zonos susidarymas ABS plastiko plokštelėse. Nustatyta, kad kuo didesnis suvirinimo greitis ir įrankio sukimosi greitis, tuo didesnės temperatūros susidaro suvirinimo zonoje aplink įrankį. Didžiausios temperatūros ABS plastiko plokštelėse buvo gautos, kai suvirinimo pastūma buvo didžiausia – 0,00067 m/s. Vertinant „*von Mises*” įtempių pasiskirstymą, buvo nustatyta, kad didžiausius įtempius plokštelės patiria per pirmąsias suvirinimo sekundes. Laikui einant ABS plastikas lydosi, minkštėja, tuo pačiu mažėja ir įtempiai. ABS plastiko suvirinimo modeliavimo metu plokštelėse susidaro iki 2 MPa įtempiai, o tai sudaro tik 3,7 % įtempių, lyginant su tempimo bandymu.
5. Naudojant „*Minitab*” statistinę programinę įrangą buvo įvertinta suvirinimo parametrų įtaka suvirinimo siūlės stiprumui. ABS plastiko suvirinimo siūlės stiprumui didžiausią įtaką darė suvirinimo pastūma (81,04 %), o įrankio sukimosi dažnis suvirinimo stiprumui turėjo mažesnę svarbą – 18,96 %. PE plastiko stiprumas priklausė nuo įrankio sukimosi dažnio (61,82 %), o įrankio pastūma sudarė tik 38,18 % svarbą suvirinimo siūlės stiprumui. PP plastikui suvirinimo

siūlės stiprumas priklausė nuo įrankio sukimosi dažnio (64,33 % ) ir nuo suvirinimo pastūmos (35,67 %). Bandymo rezultatai ir parametrų svarba skyrėsi dėl to, kad ABS plastiko, lyginant su PP ir PE plastikais, imtis buvo didesnė. Esant didesniam laisvės laipsnių skaičiui, gaunami tikslesni rezultatai.



## Literatūros sąrašas

1. Tensile Stress – Strain Curve Of Polymers. [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/lexan2.htm>
2. MLADEL, Sercer and PERO, Raos. Joining of Plastics and Composites. *Welding Engineering And Technology*, 2010, 10;
3. Indian Institute of Technology Bombay Lecture 6. Design for Joining of Plastics. [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<https://www.slideshare.net/sandeepkumarchavan/joining-of-plastics>
4. KHAN, Noor Zaman and SIDDIQUEE, Arshad Noor. Friction Stir Welding Dissimilar Aluminum Alloys, 2017, *Chapter 2, Friction Stir Welding Process*;
5. DIALAMI, Narges and CERVERA, Miguel and others. Local and global approaches to Friction Stir Welding. Universidad Politecnica de Cataluna. 2016, 90;
6. RINGH, Rupinder and KUMAR, Ranvijay and others. Friction welding of dissimilar plastic/polymer materials with metal powder reinforcement for engineering applications. 2016, 10;
7. EMAMIAN, Sattar and AWANG, Mokhtar and others. A Review of Friction Stir Welding Pin Profile. 2017, 19;
8. Friction Welding Of Plastics. [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-welding-of-plastics-059>
9. VAIČIULIS, Dainius. *Mašinų elementai 1* [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<http://www.mechanikosinzinierius.lt/wp-content/uploads/2015/08/me1-05.pdf>
10. PATEL, Sunilkumar and PATEL, Dhaval. Parametric Effect of Ultrasonic Plastic Welding On Tensile Strength For ABS, Acrylic And Polycarbonate Materials. 2013, 10;
11. ELENGOVAN, K. and BALAUSUBRAMANIAN, V. and S. Babu. Predicting Tensile Strength Of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy Joints By A Mathematical model, 2007, 6;
12. BOZKURT, Yahya. The Optimization Of Friction Stir Welding Process Parameters To Achieve Maximum Tensile Strength In Polyethylene Sheets. 2011, 15;
13. STRAND, Seth. Effects of Friction Stir Welding On Polymer Microstructure. 2004, *Brigham Young University*.
14. GAO, Jicheng and CUI, Xixi and LIU, Cheng and SHEN, Yifu. Application And exploration Of Friction Stir Welding/Processing in Plastics Industry. 2017, *Materials Science and Technology NO. 10, 1145 – 1158*.
15. ROTANATHAVORN, Wallop. Hybrid Joining of Aluminum to Thermoplastics with Friction Stir Welding. 2010, *Department of Materials Science and Engineering KTH – Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden*.

16. LOUCHE, H. And PIETTE, F and others. An experimental And Modeling Study Of The Thermomechanical Behavior of An ABS Polymer Structural Component During An Impact Test. 2008, 34;
17. GAO, Jicheng and LI, Chao and others. Improvements Of Mechanical Properties In Dissimilar Joints Of HDPE and ABS via Carbon Nanotubes During Friction Stir Welding Process. 2015, 15;
18. Everything You Need To Know About ABS Plastic [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>
19. Leadwell Products Catalogue [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<http://www.completemachinetools.com.au/files/Leadwell%20product%20brochure.pdf>
20. Coupled Eulerian Lagrange (CEL) Analysis with Abaqus [interaktyvus]  
[žiūrėta 2020 – 05 –10]. Prieiga per:  
<https://simplifiedfem.wordpress.com/about/coupled-eulerian-lagrange-cel-analysis-with-abaqus/>
21. HUANG, Y. And MENG, X and others. Friction stir welding/processing of polymers and Polymer matrix composites. 2017, 10;
22. RAWENI, A and MAJSTOROVIC, V and others. Optimization of AA5083 Friction Stir Welding Parameters Using Taguchi Method. 2018, 6;
23. YUNUS, Mohammed and ALSOUFI, Mohammad. A Statistical analysis of joint strength of dissimilar aluminium alloys formed by friction stir welding using taguchi design approach, ANOVA for the optimization of process parameters. 2015, *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 63-70;
24. ASIM, Mohammad and JAWAID, Mohammad and others. Processing of hybrid polymer composites – a review. 2016, 22;
25. PAOLETTI, A and LAMBIASE, F and DI ILIO, A. Optimization of friction stir welding of thermoplastics. 2015, 6;
26. BUENO, C and HUBER, N and others. On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber – reinforced polymer composite hybrid structures. 2016, 10.

## Priedai

### 1 priedas. Frikcinio maišymo suvirinimo g – kodas (*g – code*) CNC staklėms

```
%  
M3 S2000;  
G94 G91 G0 z-10;  
G01 z-1.7 F10;  
G04 P2000;  
G01 X100 F10;  
G00 Z11.7;  
G0 X-100;  
M30  
%
```

5.1 pav. CNC staklių G-kodo programa su pradiniais duomenimis

CNC staklėse, suvirinimo metu naudoto G-kodo (*g-code*) programos paaiškinimas (paaiškinimui panaudotas ABS plastiko frikcinio maišymo suvirinimo pirmasis bandymas):

- **M3** – įrankio sukimosi pagal laikrodžio rodyklę, komandos uždavimas. **S2000** – įrankio sukimosi greitis 2000 aps/min.
- **G94** – komanda naudojama atliekant judesius, kai įrankis nesisuka. **G0** – kodas liepia įrankiui kuo greičiau nusigauti iki užduoto taško. **Z-10** - įrankio judėjimas 10 mm z ašies kryptimi.
- **G01** – judėjimo tiesia linija komanda. **Z-1.7** įrankio judėjimas 1.7 mm z ašies kryptimi, greičiu **F10** – 10mm/min.
- **G04** – sustojimo, “Dwell time” komanda, kuri leidžia įrankiui viename taške sukis nejudant. **P2000** – laikas 2 sekundės.
- **G01** – judėjimo tiesia linija komanda. **X100** – 100 mm atstumas x ašies kryptimi, **F10** – 10 mm/min greičiu.
- **G00** – greitojo judėjimo komanda. **Z11.7** – įrankio greitasis pasikėlimas 11.7 mm atstumu, z ašies kryptimi.
- **G00** – greitojo judėjimo komanda. **X-100** – įrankio grįžimas 100 mm x ašies kryptimi, tai yra į pradinę padėtį, nulinį tašką.
- **M30** – programos užbaigimo komanda.

**2 priedas. Dalyvavimas konferencijoje „Industrial Engineering 2020“ parašytas straipsnis:  
„Investigation of friction stir welding parameters on welding seam of Acrylonitrile Butadiene  
Styrene (ABS) polymer”**

**3 Priedas. Frikcinio maišymo suvirinimo metu naudotas įrankis**

## **Investigation of friction stir welding parameters on welding seam of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) polymer**

**D. Jonaitis\***, **R. Česnavičius\*\***

\* *Kaunas University of Technology, Faculty of mechanical engineering, Studentų 56, 51424, Kaunas, Lithuania, E-mail: darjon@ktu.lt*

\*\* *Kaunas University of Technology, Faculty of mechanical engineering, Studentų 56, 51424, Kaunas, Lithuania, E-mail: ramunas.cesnavicius@ktu.lt*

### **1. Introduction**

Friction stir welding is considered to be one of the most important ways to join two plastic parts together. For comparison with conventional welding methods, friction stir welding uses less energy and does not require additional equipment. It is also a “green” technology due to its energy efficiency, versatility and environmental protection. When welding with this method, the welds are free of defects: cracks, porosity, low distortion. But also it is very important to determine the most appropriate parameters for each material to reach their melting point.

Brigham Young University (BYU, 2004) researchers are one of the only few announced friction stir welding (FSW) to polymers as successful operation. Various parameters of welding were investigated and it has been found that one of the most important welding parameters is the rotational speed and welding speed. Depending on the polymeric materials properties the rotational speed ranges from 1000 Revolutions per minute (RPM) to 6000 RPM in order to reach the melting temperature during welding. The higher this parameter is, the stronger weld is obtained. Also depending on the properties of the welding material, lower tool feed speeds were found to provide stronger polymer connection. Welding ABS plastic also was studied by K. Patel, Dhaval M. Patel. (Patel, 2013). A study explained the seam strength by varying the welding time, as well as by welding two different plastics. This work presents the study of ultrasonic welding and conclusions made in this work are such that welding time is the most important factor during ultrasonic welding. The choice of material is also a significant thing to get a stronger bond between plastics. Examples of the experiment considered that ABS plastic is better choice compared to acrylic.

There are thousands of polymers on the market today. They have various properties – softness, hardness, flexibility, brittleness. A wide selection of polymers and polymeric materials allows you to select and adapt the material to a specific manufacturing. This is driving the increase in the use of this universal material in the world. Researchers continue to work to discover new polymers, modify existing ones, which further increases the potential use of plastic. It was chosen to perform tests with ABS polymer (2009). It belongs to a family of thermoplastics with a wide range of exploitation. This plastic is often found in our environment as well. It is used to make various parts of the car interior, toys. ABS is odorless, non-toxic and easy to processed.

Welding parameters on polymeric materials have a significant impact on the welding quality and seam strength, this paper investigates influence of the feed rate and rotational speed of friction stir welding (FSW) joints strength.

## 2. Experimental details and results

The experimental process takes place in several stages. ABS specimens with dimensions 100x50x2 mm. were manufactured. Nineteen tests were performed, in which one parameter was changed and others were left unchanged. Experiment run order and friction stir welding parameters is shown in Table 1. All tests were performed with *Leadwell V-20* CNC machining center in the laboratory of Kaunas University of Technology.

The experiment was performed by inserting the plates in clamps. The tool was rotating at specific speeds from 2000 to 5000 RPM. As the tool and workpiece became hot, hard plastic pieces began to soften and melt. Then tool passed over the entire length of the plates (100 mm). After that welded plastic plates were removed from clamps and left to cool. The tool view with dimensions is shown in Figure 1 and experimental scheme is shown in Figure 2.

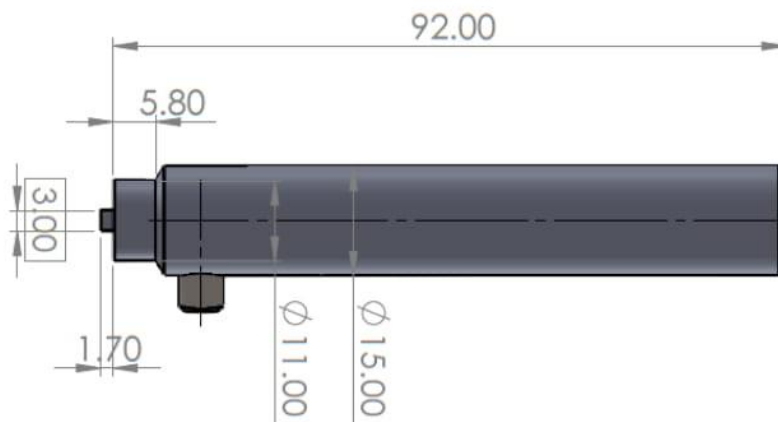


Fig. 1 Tool view with dimensions

Table 1

Friction stir welding parameters and performance sequence

Run order	Spindle speed, RPM	Feed rate, mm/min
1.	2000	10
2.	2500	10
3.	3000	10
4.	3500	10
5.	2000	20
6.	2500	20
7.	3000	20
8.	3500	20
9.	2000	30
10.	2500	30
11.	3000	30
12.	3500	30
13.	2000	40
14.	2500	40
15.	3000	40
16.	3500	40
17.	4500	40

After all plastic plates of ABS polymer was welded, next step was to test seam strength. The strength of the seam was tested with *Tinius Olsen H10KT* tensile test machine. The results were focused on the two most important parameters that we aimed to investigate: feed rate and rotational speed. The results of the tensile tests are shown in Figure 3. Only rotational speed and feed rate were changed throughout the experiment. Other parameters were constant. Dwell time was always 15 seconds. Welding depth was 1.7 mm. and the same tool was used for all welding tests.



Fig. 2 Experimental scheme. The tool welds two ABS plastic plates together with set friction stir welding parameters. Then welded plates are left to cool



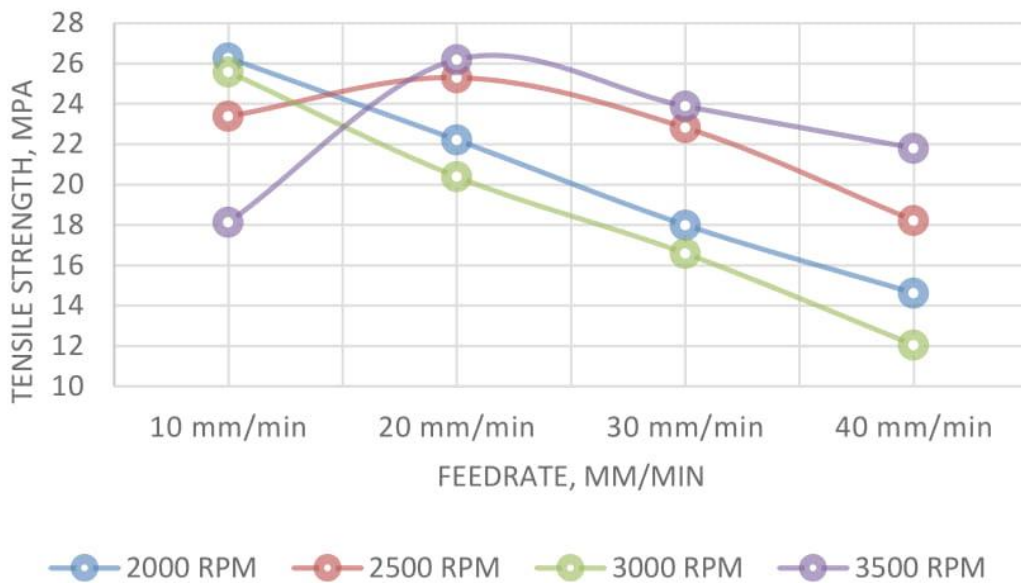


Fig. 3 Tensile test results depending on feed rate

The tensile strength results are shown in Figure 3. The analysis showed that the tool feed rate and the tool rotation speed has a significant effect on the strength of the seam. Where the welding speed was low 10 mm/min, the weld was stronger than joining ABS plates together at high speed 40 mm/min, without changing other parameters. At the 10mm/min parameters tensile strength was 25.59 MPa and at 40mm/min highest strength was 21.81 MPa.

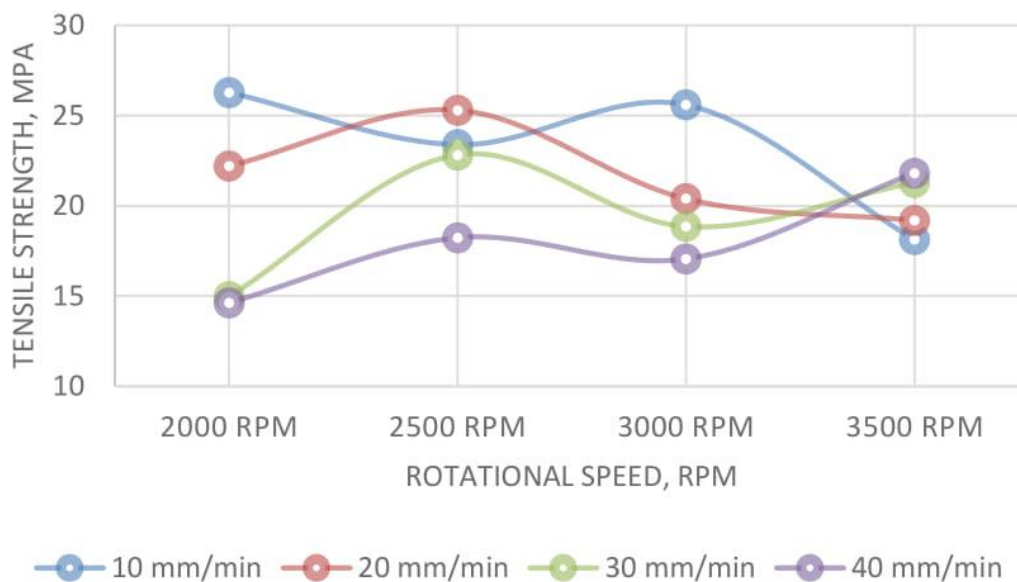


Fig. 4 Tensile test results depending on rotational speed



The results in Figure 4 showed that at a constant speed of 2000 RPM, the strongest connection is obtained when the feed rate is 10 mm/min. When the tool rotational speed is 3500 RPM, the strongest ABS seam is obtained when the tool feed rate is 40 mm/min. However, the strength differs from strongest tensile strength by almost 17%. The relatively low seam strength may have been due to the formation of a groove like defect in the welded part, it may have been caused because of higher rotational speed.

Tensile test results was used to obtain the necessary data to compare the tensile test strength with a non-welded ABS specimen. The results showed that the strength of the seam remained very high 96% when welding by friction stir method in suitable modes. Table 2.

Table 2

Tensile test results for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Material	Base material	Friction Stir Welding Results	
	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Welded seam strength and base material percentage comparison %
ABS	26.48	Highest seam strength:25.59 Lowest seam strength:12.06	High:96 Low:46

### 3. Conclusions

Investigation of the strength of friction stir welding specimens was performed. It was found that specimens that were welded at low feed rate 10-20 mm/min was with high strength of the seam. Higher tool rotational speed doesn't guarantee a high seam strength. The results suggest that the most suitable parameters to weld ABS is when feed rate is 10mm/min and the tool rotating speed is 2000 RPM. To get good efficiency of the weld strength at higher welding speed, the best parameters are 30 mm/min and 3500 RPM. These parameters are the best option for ABS polymer. If another material is chosen, other tests must be performed with the tensile strength machine monitoring the connection.

### References

1. H. Louche, F. Piette-Coudol, R. Arrieux, J. Issartel. 2008. An experimental and modelling study of the thermomechanical behaviour of an ABS polymer structural component during an impact test. International Journal of Impact Engineering, 2009, pp. 847-861.

2. Sunilkumar K. Patel, Prof. Dhaval M. Patel. 2013. Parametric Effect Of Ultrasonic Plastic Welding On Tensile Strength For ABS, Acrylic And Polycarbonate Materials. [online] MPRA [accessed 29 April. 2020]. Available from Internet:  
<https://www.ijert.org/research/parametric-effect-of-ultrasonic-plastic-welding-on-tensile-strength-for-abs-acrylic-and-polycarbonate-materials-IJERTV2IS3124.pdf>
3. Seth R. Strand. Brigham Young University. 2004. Effects of Friction Stir Welding Polymer Microstructure. [online] MPRA [accessed 29 April. 2020]. Available from Internet:  
<https://scholarsarchive.byu.edu/etd/42/>

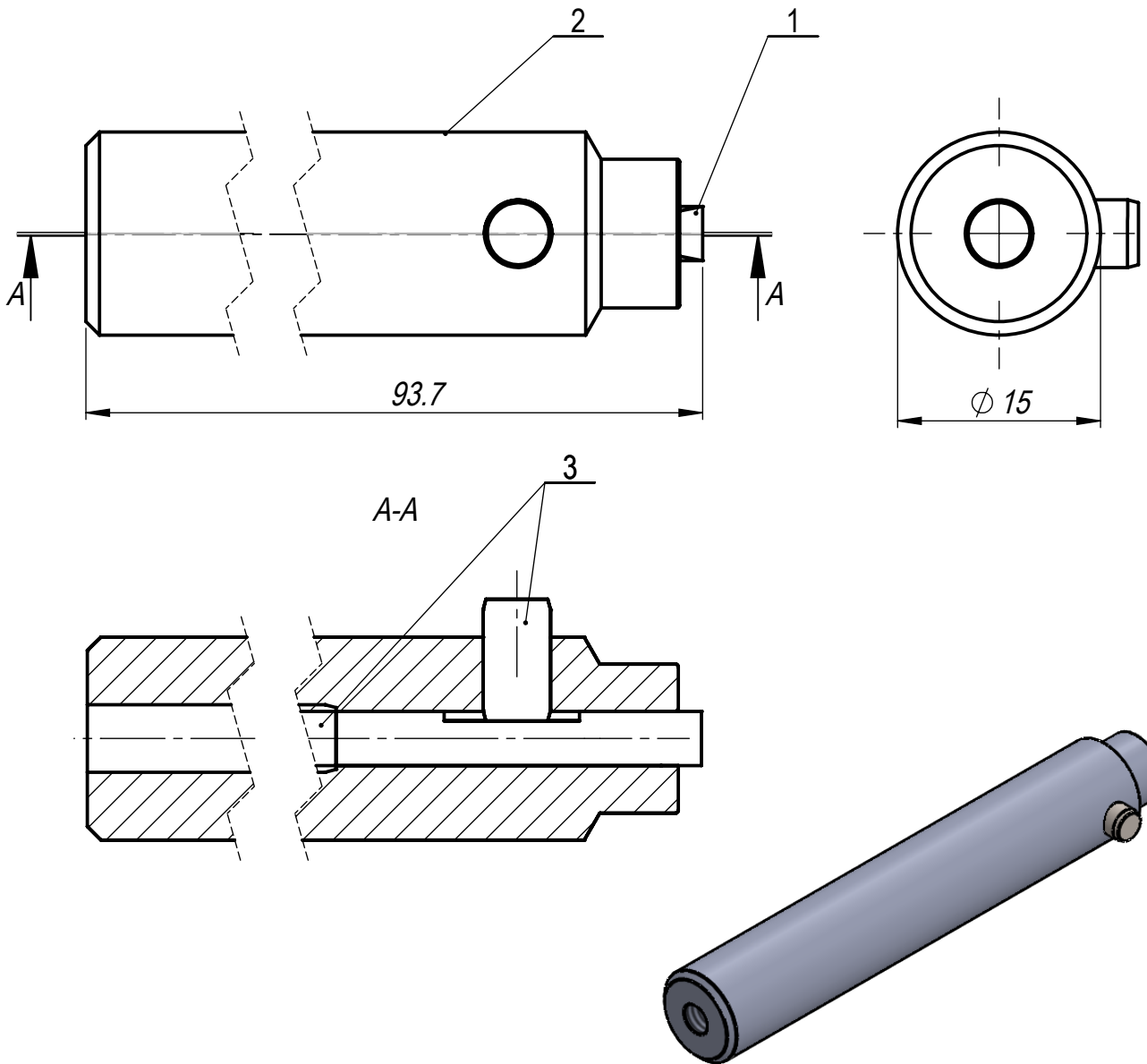
Darius JONAITIS, Ramūnas ČESNAVIČIUS

### **Investigation of friction stir welding parameters on welding seam of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) polymer**

#### **Summary**

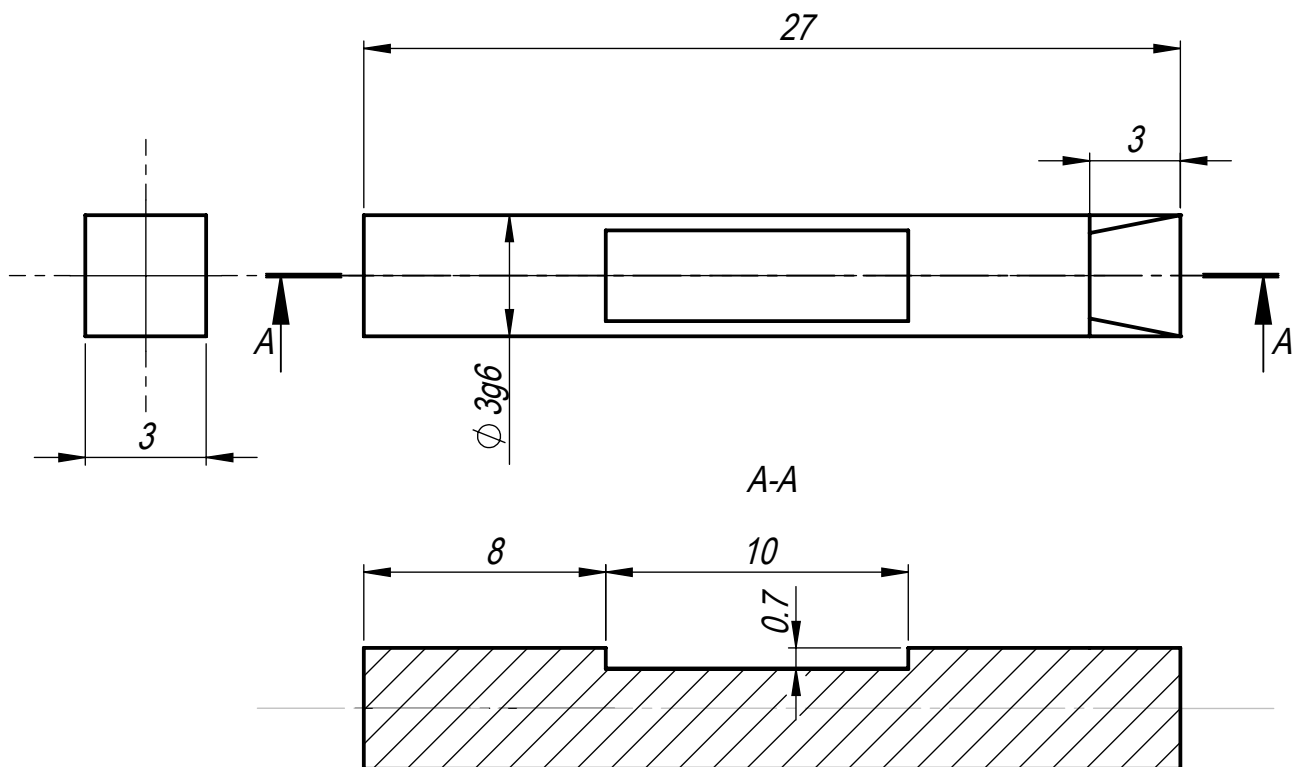
The aim of this work is to investigate friction stir welding (FSW) joint seam strength of Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer. The paper presents the main reasons that determine the quality and durability of friction stir welding, method advantages and disadvantages are also discussed. The tests were performed with Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) plastic by changing key parameters: rotational speed and feed rate. The strength of the welds obtained was checked by a tensile testing machine. Optimal parameters have also been set to obtain the strongest possible connection, as well as to avoid defects.

**Keywords:** welding, ABS, seam, welding parameters.



Numeris	Detalės numeris	Aprašymas	Vnt.
1	FS.01.00.01	Įrankio ašelė	1
2	FS.01.00.02	Įrankio kotas	1
3	ISO 8734 - 5 x 12 - A - St	ISO 8734 - 5 x 12 srieg. kaištis	3

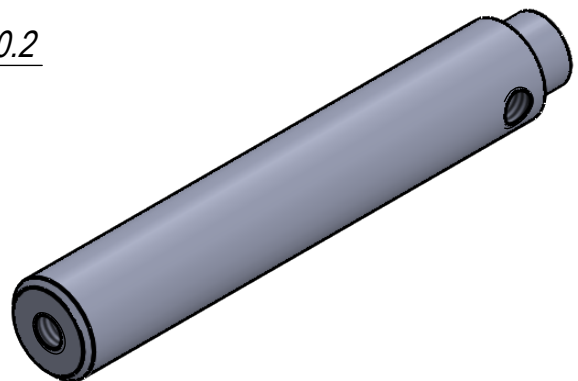
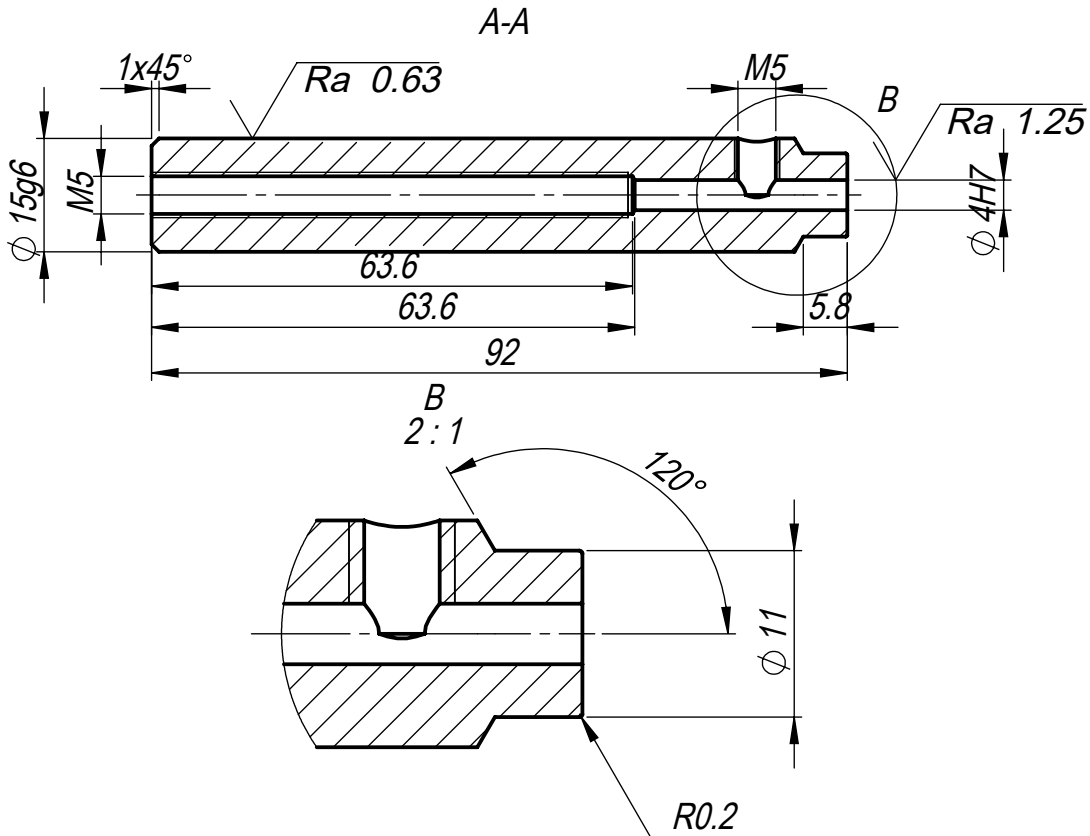
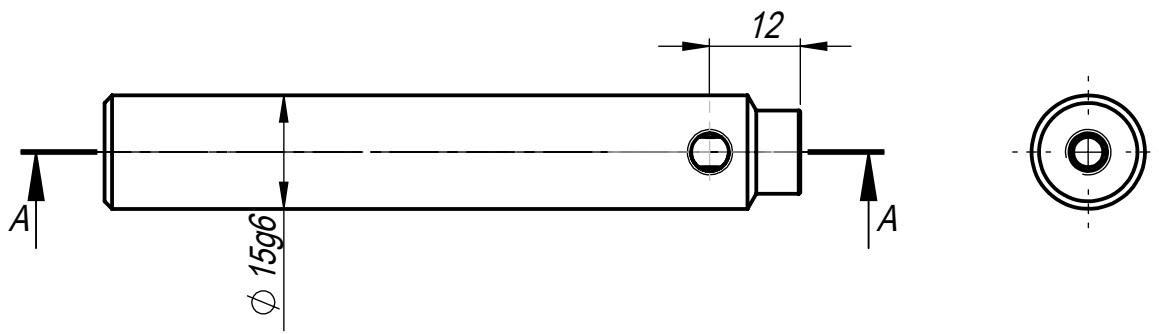
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas C45 LST EN 10083-1	Mastelis 1:2
Atsakinga žinyba <b>MIDF</b>	Konsultantas	Dokumento tipas Junginio brėžinys	Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas 	Rengė Darius Jonaitis	Antraštė Frikcinio maišymo suvirinimo įrankis	FS.01.00.00SB	
	Tvirtino Ramūnas Česnavičius		Laida A	Data 5/23/2020
			Kalba Lt	Lapas 1/1



1. Nenurodytos matmenų, formos ir padėties nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai  $R=0.5$  mm.

✓ Ra 6.3

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas X37CrMoV51 LST EN	Mastelis 4:1
Atsakinga žinyba <b>MIDF</b>	Konsultantas	Dokumento tipas <b>Detalės brėžinys</b>	Dokumento statusas <b>Mokomasis</b>	
Savininkas 	Rengė <b>Darius Jonaitis</b>	Antraštė <b>Įrankio ašėlė</b>	<b>FS.01.00.01</b>	
	Tvirtino <b>Ramūnas Česnavičius</b>		Laida A	Data 5/23/2020
			Kalba Lt	Lapas 1/1



1. Nenurodytos matmenų, formos ir padėties nuokrypos pagal LST EN 22768-mK.
2. Nenurodyti suapvalinimo spinduliai  $R=0.5$  mm.

$\sqrt{Ra 6.3}$  (✓)

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas C45 LST EN 10083-1	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba <b>MIDF</b>	Konsultantas	Dokumento tipas <b>Detalės brėžinys</b>	Dokumento statusas <b>Mokomasis</b>	
Savininkas 	Rengė Darius Jonaitis	Antraštė <b>Įrankio kotas</b>	FS.01.00.02	
	Tvirtino Ramūnas Česnavičius		Laida A	Data 5/23/2020
			Kalba Lt	Lapas 1/1