

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

# **Plonalaksčio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

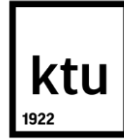
---

**M. Kuodys**  
Projekto autorius

**Prof. dr. R. Dundulis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



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

# **Plonalaksčio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

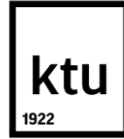
**Mindaugas Kuodys**  
Projekto autorius/autorė

**Prof. dr. Romualdas  
Dundulis**  
Vadovas/Vadovė

**Doc. dr. Sigitas Kilikevičius**  
Recenzentas/Recenzentė

---

**Kaunas, 2020**



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

## **Plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Mindaugo Kuodžio*, baigiamasis projektas tema „*Plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo 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.

---

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

---

(parašas)



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Studijų programa – MECHANIKOS INŽINERIJA 6211EX009

**Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis**

**Studentui** – Mindaugui Kuodžiui

**1. Baigiamojo projekto tema –**

Plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Investigation of strength of the connections sheet metal parts and fasteners

*(Anglų kalba)*

**2. Baigiamojo projekto tikslas –**

Atlikti eksperimentinį ir skaitinį tyrimus nustatant ir aprašant plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo elementais stiprumo parametrus

**3. Pradiniai baigiamojo projekto uždaviniai –**

1. Atlikti jungčių analizę ir nustatyti aktualius parametrus
2. Pasiruošti bandinius ir bandymų įrangą
3. Atlikti eksperimentinius tyrimus
4. Sudaryti skaičiuojamąjį modelį
5. Atlikti BEM tyrimą

**4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –**

1. Tirti nuo 1 iki 2 mm storio plieno lakštus
2. Skaičiuojamąjį modelį spręsti statinės analizės metodu

Projekto autorius

Mindaugas Kuodys

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. Dr. Romualdas Dundulis

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Krypties studijų programos vadovas

Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Kuodys, Mindaugas. Plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Romualdas Dundulis ; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *plonalakštis plienas, presuojamos tvirtinimo detalės, tempimas, plastiškumo modelis.*

Kaunas, 2020. 48 p.

### **Santrauka**

Darbe atliekamas į plonalakštį plieną įpresuotų tvirtinimo detalių – varžtų bei veržlių – ištempimo jėgos bei prasukimo momento tyrimai. Nustatomos šių charakteringų parametrų priklausomybės nuo plonalakščio plieno metalo storių, medžiagos ir tvirtinimo detalių dydžio. Bandymų mašina „Tinius Olsen H10KT“ išmatuojama tvirtinimo detalės ištraukimo jėga, nustatomos deformacijos. Apdorojant rezultatus įvertinama bandinių parametrų sklaida bei priežastys. Šie rezultatai lyginami su sudarytu baigtinių elementų modeliu „Ansys Workbench“ programinėje aplinkoje. Skaitmeniniu modeliu gauti rezultatai validuojami lyginant su rezultatais, gautais eksperimentinių tyrimų metu.

Kuodys, Mindaugas. Investigation of strenght of the connections sheet metal parts and fasteners. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Romualdas Dundulis; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Mechanical Engineering

Key words: *sheet metal, sheet metal fasteners, tensile test, plasticity model.*

Kaunas, 2020. 48 p.

### **Summary**

Research is conducted on connections between sheet metal and sheet metal fasteners – bolts and nuts by performing tensile tests and torque tests. Depending characteristics are analysed based on sheet metal thickness, material properties and thread sizes of sheet metal fasteners. „Tinius Olsen H10KT“ testing machine is used to define maximum withstandable loads, deformation sizes of such connections. Analysis of results is based on dispersion of the characteristics. Practical test results are compared to finite element analysis results performed on „Ansys workbench“ program. Finite elements analysis results are validated through the practical tests.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Tvirtinimo detalės plonalakščiame pliene .....</b>	<b>11</b>
1.1. Objektas .....	11
1.1.1. Tvirtinimo detalių aprašymas .....	11
1.2. Funkciniai jungčių parametrai .....	13
<b>2. Eksperimentinė dalis .....</b>	<b>14</b>
2.1. Bandinių analizė .....	14
2.2. Papildoma įranga bandiniams įtvirtinti .....	17
2.3. Ištraukimo jėgos matavimas .....	18
2.3.1. Ištempimo jėgos matavimų rezultatai.....	20
2.4. Prasukimo momento matavimas.....	27
2.22 Prasukimo momento matavimų rezultatai .....	31
<b>3. Skaitinis eksperimentas.....</b>	<b>33</b>
3.1. Skaičiuojamojo modelio aprašymas ANSYS aplinkoje .....	33
3.2. Rezultatų palyginimas .....	35
3.3. Modelio pritaikymas.....	38
<b>Išvados .....</b>	<b>39</b>
<b>Literatūra .....</b>	<b>40</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>41</b>
1 priedas. Bandinių parametrų analizės suvestinė .....	41
2 priedas. Bandinių tvirtinimo įrangos brėžinys.....	42
3 priedas. Prasukimo bandinių tvirtinimo brėžinys .....	43
4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai .....	44

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Bandinių parametrų suvestinė .....	16
<b>2.2 lentelė.</b> Tempimo bandymų rezultatų suvestinė.....	22
<b>2.3 lentelė.</b> Prasukimo momento matavimo rezultatai .....	31
<b>3.1 lentelė.</b> Skaitinio ir eksperimentinio tyrimo reakcijos jėgų palyginimas.....	37



## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Presuojamas varžtas [3].....	11
<b>1.2 pav.</b> Presuojama veržlė [3].....	12
<b>1.3 pav.</b> Įprastinis lakštų sujungimo būdas [3].....	12
<b>1.4 pav.</b> Tvirtinimo detalių metalo lakštams presavimo mašina [4] .....	12
<b>1.5 pav.</b> Serverių talpinimo spintos [5] .....	13
<b>2.1 pav.</b> Bandinys su veržle (kairėje) ir varžtu (dešinėje).....	14
<b>2.2 pav.</b> Tvirtinimo detalių atstumo iki briaunos ar lenkimo pasiskirstymas .....	14
<b>2.3 pav.</b> Detalių kiekis priklausomai nuo komponento sriegio.....	15
<b>2.4 pav.</b> Bandinio matmenys.....	15
<b>2.5 pav.</b> Įprastinės formos tempimo-gniuždymo bandinys .....	17
<b>2.6 pav.</b> Papildomos tvirtinimo įrangos schema .....	17
<b>2.7 pav.</b> Pagaminta papildoma bandymų įranga .....	18
<b>2.8 pav.</b> Bandymų mašina [6].....	18
<b>2.9 pav.</b> Bandinys, įtvirtintas į tempimo-gniuždymo bandymų mašiną.....	19
<b>2.10 pav.</b> Bandymų mašinos nustatymo parametrai.....	19
<b>2.11 pav.</b> Visi bandiniai prieš bandymus .....	20
<b>2.12 pav.</b> Bandymų mašinos programinės įrangos rezultatų pateikimas .....	20
<b>2.13 pav.</b> Tipiškas jungties su veržle suirimas.....	21
<b>2.14 pav.</b> Tipiškas jungties su varžtu suirimas.....	21
<b>2.16 pav.</b> Presuojamų veržlių bandinių tempimo jėgos priklausomybė nuo deformacijos.....	24
<b>2.17 pav.</b> Presuojamų varžtų bandinių tempimo jėgos priklausomybė nuo deformacijos.....	25
<b>2.18 pav.</b> Ištempimo jėgos palyginimas kintant metalo storiui.....	25
<b>2.19 pav.</b> Ištraukimo jėgos priklausomybė nuo metalo rušies .....	26
<b>2.21 pav.</b> Supaprastinta mechaninio dinamometro schema [10].....	27
<b>2.23 pav.</b> Įtvirtintas prasukimo bandinys .....	28
<b>2.24 pav.</b> Prasukimo momento bandymo atlikimas .....	29
<b>2.28 pav.</b> Bandinių su presuojamais varžtais prasukimo momento mavavimo rezultatai .....	32
<b>2.29 pav.</b> Bandinių su presuojamomis veržlėmis prasukimo momento matavimo rezultatai.....	32
<b>3.1 pav.</b> Presuojamo varžto medžiagos aprašymas .....	33
<b>3.2 pav.</b> Šaltai valcuoto plieno lakšto medžiagos aprašymas .....	34
<b>3.3 pav.</b> Skaičiuojamojo modelio baigtinių elementų tinklelis.....	34
<b>3.4 pav.</b> Skaičiuojamojo modelio kraštinės sąlygos .....	35
<b>3.5 pav.</b> Jungties Von Mises įtempių vaizdas .....	35
<b>3.6 pav.</b> Plokštelės deformacijų vaizdas .....	36
<b>3.7 pav.</b> Plokštelės Von Mises įtempių vaizdas .....	36
<b>3.8 pav.</b> Reakcijos jėgų palyginimas.....	37

## Įvadas

Įprastinio varžtinio sujungimo parinkimui yra ne tik aprašytos metodikos, tačiau ir sukurti priedėliai kompiuterinėse projektavimo programose, skirti šių sujungimų stiprumo patikrinimui. Tačiau sudarant konstrukcijas iš plonalakščio plieno dažnai tenka parinkinėti specialiai plonalakščiam plienui sukurtas tvirtinimo detales (t.y. presuojamus arba užtraukiamus varžtus, veržles). Tokių tvirtinimo detalių gamintojų pateikiamuose kataloguose dažniausiai būna tik aprašyti šių komponentų parametrai, tačiau nėra informacijos, kokių savybių bus pačios jungtys tarp tvirtinimo detalių ir plonalakščio metalo. Juk tas pats komponentas (pavyzdžiui nerūdijančio plieno) gali būti naudojamas tiek aliuminio, tiek cinkuoto plieno, tiek nerūdijančio plieno lakšte. Taip pat vienokią ištraukimo jėgą ar nusukimo momentą atlaikys į 1 mm storio lakštą įpresuotas komponentas, o jau kitokią į 3 mm storio lakštą.

Magistro studijų programos metu atliekamas tiriamasis darbas „Plonalakščio plieno jungčių su tvirtinimo detalėmis stiprumo tyrimas“. Šio darbo užduotis yra atlikti eksperimentus su tvirtinimo detalėmis, kurios yra įpresuotos į skirtingo storio bei įvairių savybių plonalakščio plieno ir aliuminio plokšteles. Atlikus šiuos bandymus tyrimo metu turės būti sumodeliuoti atitinkamų parametru bandiniai ir nustatytos stipruminės bandinių savybės naudojant 3D projektavimo bei baigtinių elementų skaičiavimų paketus Solidworks, Ansys . Sukurti ir aprašyti modeliai turės būti atlikti taip, kad stipruminių skaičiavimų rezultatai atitektų eksperimentiniu būdu gautas vertes. Turint šias vertes bus galima ekstrapoliuoti rezultatus 3D modelio pagalba ir sudaryti metodiką, kaip tiksliai apsirašyti skaičiuotiną modelį programinėje erdvėje.

Šio tyrimo metu bus nustatytos priklausomybės, tarp įvairių tipų bei parametru tvirtinimo detalių ir plieno lakštų. Jomis remiantis, bus galima metodiškai parinkinėti reikiamas tvirtinimo detales įvairiomis situacijomis, neieškant analogų ar neatliekant papildomų bandymų konkrečiam variantui. Tokių būdu gali būti sumažinami projektavimo ir bandymų kaštai bei laikas.

Darbo tikslas yra atlikti eksperimentinį ir skaitinį tyrimus nustatant ir aprašant plonalakščio plieno konstrukcijų jungčių su tvirtinimo elementais stiprumo parametrus.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti jungčių analizę ir nustatyti aktualius parametrus
- Pasiruošti bandinius ir bandymų įrangą
- Atlikti eksperimentinius tyrimus
- Sudaryti skaičiuojamuosius modelis
- Atlikti tyrimą BEM

## 1. Tvirtinimo detalės plonalakščiame pliene

### 1.1. Objektas

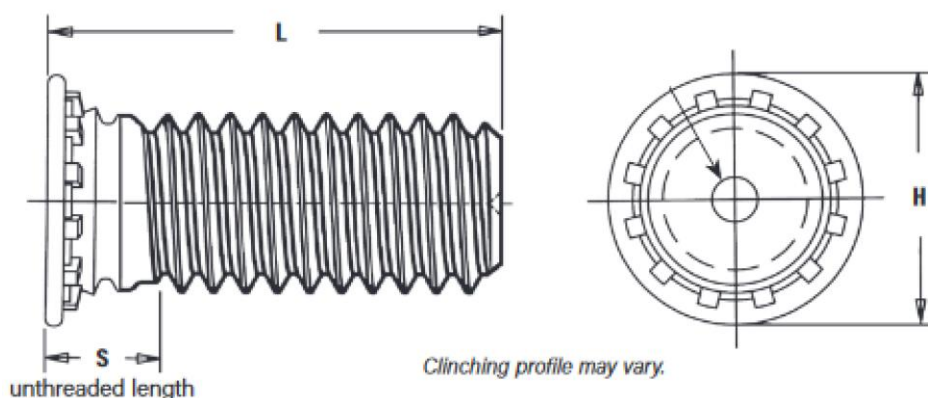
Tiriamąjį darbo objektą pasirinkta jungčių tarp plonalakščio plieno ir tvirtinimo detalių stipruminiai tyrimai.

Tiriamąjį darbo metu bus tyrinėjami plonalakščių plienų – t.y. nuo 1 iki 2 mm storio lakštinių plienų sąveika. Įvairios charakteristikos bus nustatomos jungtims iš šaltai valcuoto, nerūdijančio plieno bei aliuminio lakštų. Šios medžiagos sudaro didžiąją dalį produkcijos metalo lakštų apdirbimu užsiimančiose įmonėse.

Tvirtinimo detalės – tai specialiai plonalakščiam plienui skirtos tvirtinimo detalės. Jos gali būti veržlės arba varžto tipo. Storesnio metalo lakštų detalėms sujungti dažniausiai pasirenkamas tvirtinimo būdas yra prasriegiant skylės. Tačiau plonų metalo lakšto storis neleidžia suformuoti pakankamo kiekio sriegio apvijų, kad būtų užtikrinamas reikiamas sujungimo stiprumas. Tokiu atveju naudojamos kelios alternatyvos: šampavimo įrankiais ištempiamos kiaurymės, dedami presuojami arba kniedijami komponentai. Šiuo metu sparčiai plinta presuojamų varžtų (1.1 pav.) ir veržlių (1.2 pav.) panaudojimas. Būtent šios tvirtinimo detalės ir bus analizuojamos darbe.

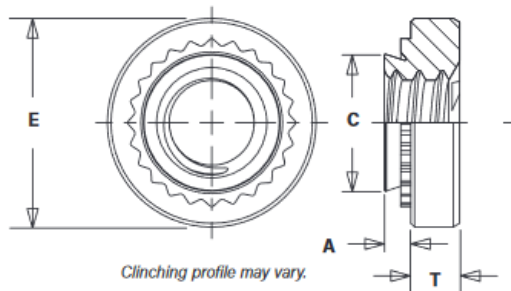
#### 1.1.1. Tvirtinimo detalių aprašymas

Presuojami varžtai (1.1 pav.) – tai tokie varžtai, kurie į metalo lakštą įpresuojami specialia presavimo mašina (1.4 pav.). Skylė šiems varžtams parenkama mažesnė, nei varžto įpresuojama dalis ir varžto dantukai įsiglemžia į metalą, taip sudarydami standžią kontaktinę jungtį su metalo lakštu.

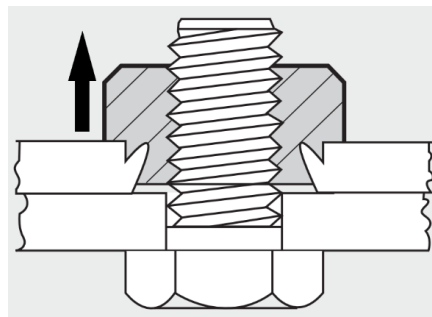


1.1 pav. Presuojamas varžtas [3]

Presuojamos veržlės (1.2 pav.) – tai tokios veržlės, kurios į metalo lakštą įpresuojamos specialia presavimo mašina. Skylė šioms veržlėms parenkama mažesnė, nei veržlės įpresuojama dalis ir veržlės dantukai įsiglemžia į metalą, taip sudarydami standžią kontaktinę jungtį su metalo lakštu.



**1.2 pav.** Presuojama veržlė [3]



**1.3 pav.** Įprastinis lakštų sujungimo būdas [3]

Įprastinė lakštinio sujungimo, kuriame panaudojama presuojama veržlė, schema pavaizduota 1.3 paveikslėlyje. Vienoje lakšto pusėje įpresuojama veržlė, o kitoje pusėje pridedama kita lakštinė detalė ir sujungiama varžtu. Tačiau šio darbo metu bus nagrinėjama jungtis tarp lakšto ir veržlės, kai veržlė ištraukiama į tą pačią pusę, į kurią ir buvo įpresuota (ištraukimo kryptis pažymėta rodykle 1.3 pav.).



**1.4 pav.** Tvirtinimo detalių metalo lakštams presavimo mašina [4]

Presavimo mašina (1.4 pav.) – tai hidraulinis presas, galintis supresuoti tiek varžto, tiek veržlės tipo tvirtinimo detales. Pagal komponentą, parenkama matrica, į kurią tas komponentas yra įstatomas, ant komponento rankomis darbuotojas uždeda lakštinę detalę, į kurią presavimo mašina puansonu įspaudžia tvirtinimo komponentą.

## 1.2. Funkciniai jungčių parametrai

Plonalakščio plieno gaminiai dažniausiai yra tam tikros korpusų, laikiklių detalės, skirtos įvairių elektros, elektronikos, plastikinių detalių komponentams montuoti. Kaip konkrečius pavyzdžius galima išskirti elektros skydines, serverių talpinimo spintas (1.5 pav.), pašto dėžutes, stacionarių kompiuterių dėžes ir kita. Tokius gaminius veikia statinės apkrovos, pavyzdžiui sunkio jėga, todėl svarbi jungties tarp metalo lakšto ir tvirtinimo detalės charakteristika yra tvirtinimo detalės ištraukimo jėga, t.y. kokiai minimaliai ašinei jėgai veikiant yra suardoma jungtis.



1.5 pav. Serverių talpinimo spintos [5]

Tvirtinimo detalės dažniausiai yra srieginės, todėl surinkinėjant gaminius iškyla rizika perveržti, prasukti tvirtinimo detales. Nėra tiksliai aišku, kuriais atvejais bus sugadinamas tvirtinimo detalės sriegis, o kuriais atvejais pirmiausia gali būti pažeidžiama jungtis tarp metalo lakšto ir tvirtinimo detalės. Todėl dar vienas svarbus parametras yra jungties atlaikomas sukimo momentas, iki kurio jungtis lieka nepažeista.

Taigi, pagrindiniai plonalakščio plieno tvirtinimo detales charakterizuojantys dydžiai, reikalingi šių detalių parinkimui – tvirtinimo detalės ištraukimo jėga ir prasukimo momentas. Todėl tyrimo metu bus atliekami 2 skirtingi bandymai:

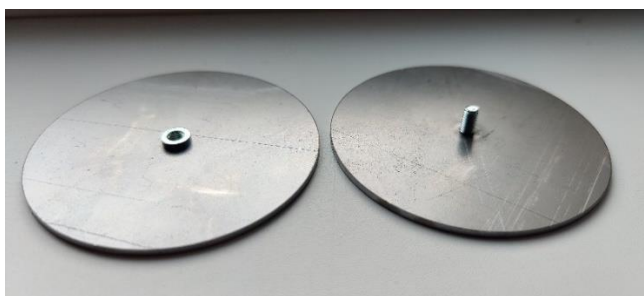
1. Tempimo griuždymo bandymas – siekiant įsivertinti ašinės jėgos apkrovas skirtingų metalo lakštų saveikos su komponentais įtakai.
2. Prasukimo momento matavimas – siekiant įvertinti konstrukcijai maksimalius leistinus konstrukcijai tenkančius sukimo momentus, ties kuriais būtų užtikrinamas jungčių vienalytiškumas.

## 2. Eksperimentinė dalis

### 2.1. Bandinių analizė

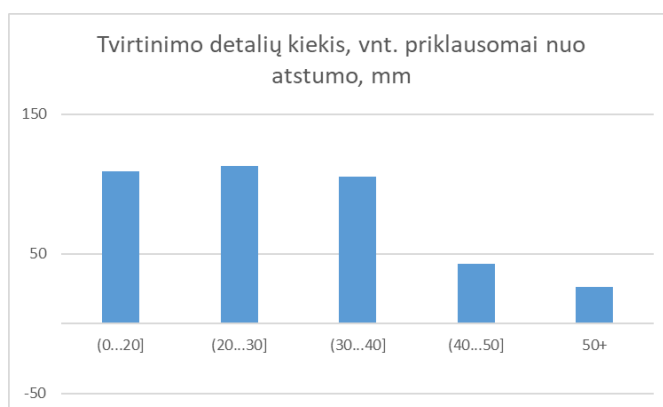
Norint atlikti 1.2 poskyryje aprašytus ištempimo jėgos ir prasukimo momento bandymus, pirmiausia reikia apsibrėžti, kokios formos turi būti bandiniai, kad tiktų abiem bandymų tipams, jų matmenis bei imtį.

Pasirinkta bandinio forma – apvali plokštelė su per vidurį įpresuotu varžtu arba veržle (2.1 pav.). Norint tokį bandinį įtvirtinti į KTU laboratorijose esančią bandymų mašiną „Tinius Olsen H10KT“ reikalinga papildoma įranga, kuri aprašyta 2.2 poskyryje.



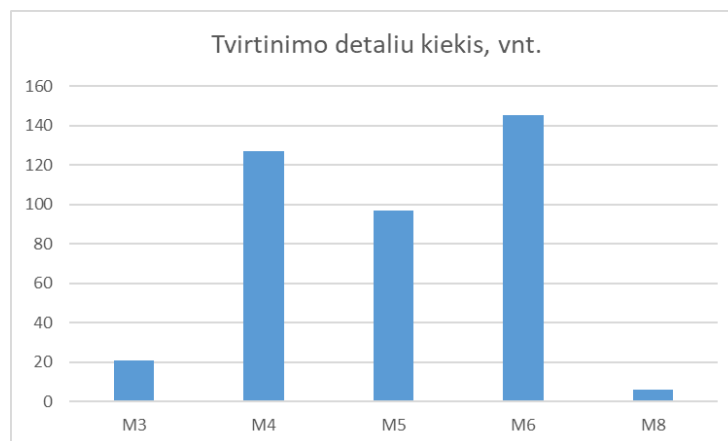
2.1 pav. Bandinys su veržle (kairėje) ir varžtu (dešinėje)

Sekančio žingsnio metu buvo atliktas statistinis tyrimas norint nustatyti, kokių matmenų turi būti bandinio plokštelė. Atsitiktiniu būdu paimta 50 įmonėje gaminamų detalių su presuojamomis tvirtinimo detalėmis. Išmatuota, koks yra kiekvienos tvirtinimo detalės atstumas iki detalės krašto – lenkimo briaunos arba plokštumos kraštinės. Šioms detalėms išmatavus mažiausius atstumus nuo tvirtinimo detalės centro iki krašto, buvo ieškoma vidutinės reikšmės. Gautoji reikšmė, suapvalinti iki sveiko skaičiaus – 25 mm. Analizės rezultatai pateikiami Priedas 1, o atstumų pasiskirstymas gaminiuose pavaizduotas 2.2 paveikslėlyje.



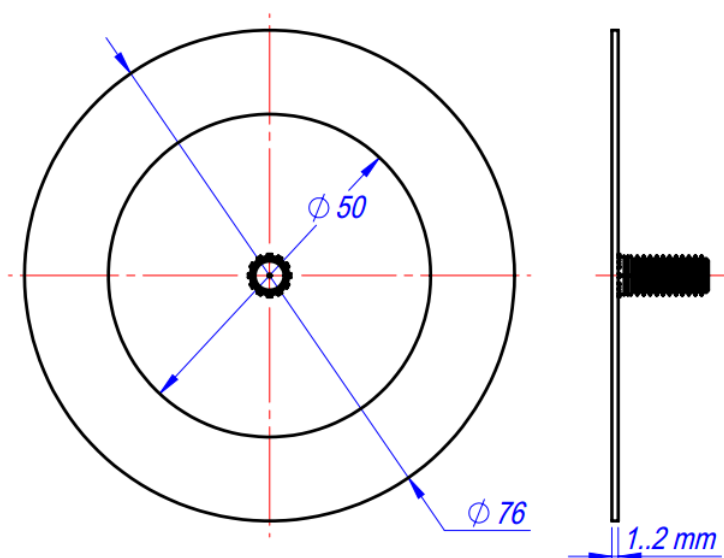
2.2 pav. Tvirtinimo detalių atstumo iki briaunos ar lenkimo pasiskirstymas

Taip pat buvo sumuojama, kiek ir kokio dydžio sriegio komponentų buvo panaudota analizuojamoje gaminių imtyje. Šioje imtyje buvo aptinkami 5 skirtingų metrinių sriegių komponentai: M3, M4, M5, M6 ir M8. 2.3 paveikslėlyje matomas susumuotas kiekvieno skirtingo dydžio sriegio komponentų kiekis. Taip pat matome, kad labiausiai paplitę yra M4 ir M6 dydžio metrinių sriegių tvirtinimo detalės.



**2.3 pav.** Detalių kiekis priklausomai nuo komponento sriegio

Pagal šiuos duomenis, galime apibrėžti šiuos bandinių parametrus: Bandinio plokštelėje turės būti užtikrinamas bent 50 mm skersmens plotas, kurio neveiks jokia atrama, o į plokšteles bus įpresuojamos M4 ir M6 sriegių tvirtinimo detalės. Pačios bandinio plokštelės skersmuo yra šiek tiek padidintas, kad būtų galima šią plokštelę įtvirtinti į bandymų įrangą, aprašytą 2.2 poskyryje.



**2.4 pav.** Bandinio matmenys

Paskutinis žingsnis, apibrėžiantis bandinius, buvo jų imties pasirinkimas. Šio pasirinkimo metu nustatyti parametrai (2.1. lentelė.): metalo rūšis, metalo storis, plokštelės skersmuo, tvirtinimo detalė, bandinių kiekis. Parenkant metalo rūšį, storį bei tvirtinimo detalę nebuvo atliekama papildoma analizė, tačiau buvo vadovaujama kriterijumi – tokių parametru metalo lakštai bei tvirtinimo detalės turėjo būti pastoviai naudojami gamyboje (bet kuriuo duotuoju momentu gamyboje turi būti bent vienas gaminys iš tokio metalo ar su tokia tvirtinimo detale). Bandinių kiekis buvo pasirinktas minimalus, t.y. po 3 vienetus bandinių tempimo ir prasukimo bandymams, todėl kiekvienos konfigūracijos bandinių buvo pagaminta po 6 vienetus.

## 2.1 lentelė. Bandinių parametrų suvestinė

Eil. Nr.	Metalas	Storis, mm	Plokštelės skersmuo, mm	Tvirtinimo detalė	Kiekis, vnt.
1	Sheet Cold roll DC01	1	76	PRESS NUT S M6 0 ZN (D8.8)	6
2	Sheet Cold roll DC01	1	76	PRESS NUT S M4 1 ZN (D5.4)	6
3	Sheet Cold roll DC01	1	76	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	6
4	Sheet Cold roll DC01	1	76	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	6
5	Sheet Cold roll DC01	1.5	76	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	6
6	Sheet Cold roll DC01	1.5	76	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	6
7	Sheet Cold roll DC01	1.5	76	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	6
8	Sheet Cold roll DC01	1.5	76	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	6
9	Sheet Cold roll DC01	1.5	76	PRESS NUT ARB M6 008 ZN (D9.7)	6
10	Sheet AL H22	1.5	76	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	6
11	Sheet AL H22	1.5	76	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	6
12	Sheet AISI 304 2B	1.5	76	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	6
13	Sheet AISI 304 2B	1.5	76	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	6
14	Sheet Cold roll DC01	2	76	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	6
15	Sheet Cold roll DC01	2	76	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	6
16	Sheet Cold roll DC01	2	76	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	6
17	Sheet Cold roll DC01	2	76	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	6
				<b>Viso</b>	<b>102</b>

Paskutinis žingsnis, apibrėžiantis bandinius, buvo jų imties pasirinkimas. Šio pasirinkimo metu nustatyti parametrai (2.1. lentelė.): metalo rūšis, metalo storis, plokštelės skersmuo, tvirtinimo detalė, bandinių kiekis. Parenkant metalo rūšį, storį bei tvirtinimo detalę nebuvo atliekama papildoma analizė, tačiau buvo vadovaujama kriterijumi – tokių parametrų metalo lakštai bei tvirtinimo detalės turėjo būti pastoviai naudojami gamyboje (bet kuriuo duotuoju momentu gamyboje turi būti bent vienas gaminyš iš tokio metalo ar su tokia tvirtinimo detale). Bandinių kiekis buvo pasirinktas minimalus, t.y. po 3 vienetus bandinių tempimo ir prasukimo bandymams, todėl kiekvienos konfigūracijos bandinių buvo pagaminta po 6 vienetus.

2.1. Lentelėje nurodyti metalo rūšies ir tvirtinimo detalių pavadinimai anglų kalba, būtent taip, kaip jie yra aprašomi įmonės duombazėje.

Pasirinktos metalo rūšys:

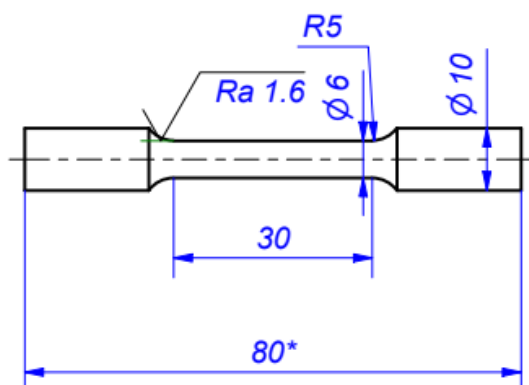
- Šaltai valcuotas plieno lakštas
- Aliuminis, H22 klasės
- Nerūdijantis plienas, AISI 304 rūšies

Pasirinktos tvirtinimo detalės, kiekvienam metalo storiui po vieną M4 ir M6 sriegio presuojamą vartą bei veržlę.



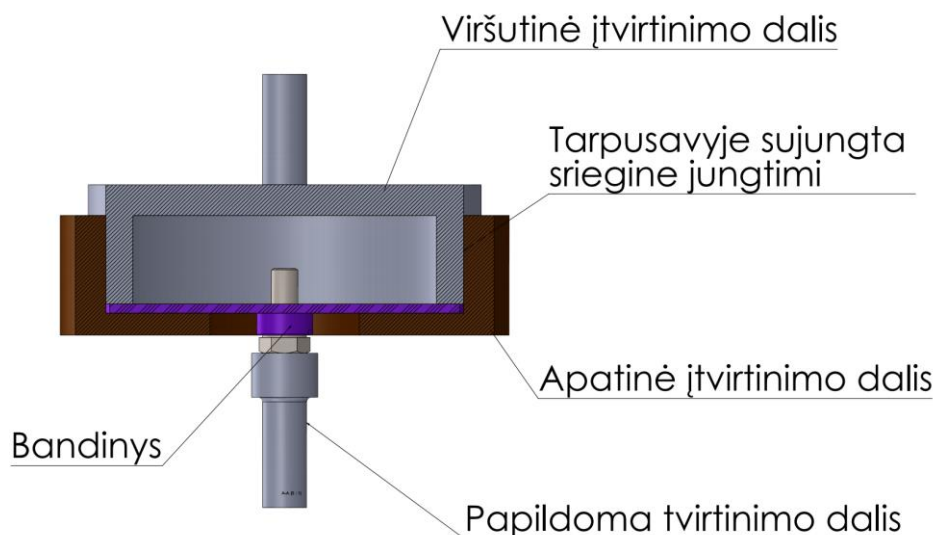
## 2.2. Papildoma įranga bandiniams įtvirtinti

Šiuo metu Kauno Technologijos Universitete naudojamai bandymų mašinai „Tinius Olsen H10KT“ yra pritaikyta įranga įprastiniams tempimo-gniuždymo bandiniams (2.5 pav.). Mūsų atveju reikia papildomos bandymo įrangos, kuri įsistatytų į jau esamą. Todėl svarbiausi įprastinio bandinio parametrai – įtvirtinimo skersmuo (10 mm), tvirtinamos dalies ilgis (20mm).



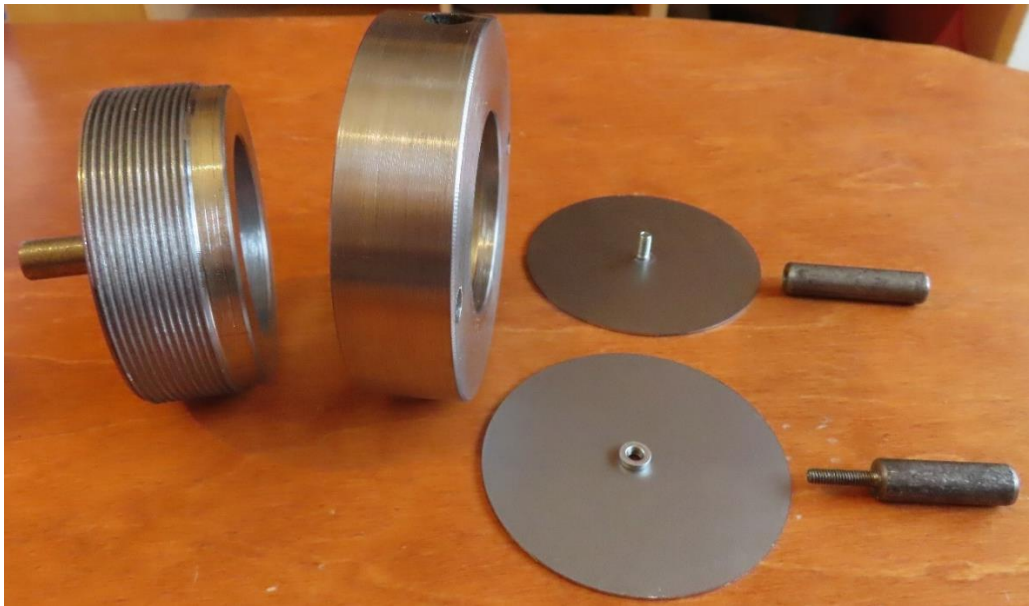
2.5 pav. Įprastinės formos tempimo-gniuždymo bandinys

Remiantis šiais įprastinio parametrais, suprojektuota papildoma įranga bandiniui įtvirtinti, kurios principinė schema parodyta 2.6 paveikslėlyje. Detalus tvirtinimo įrangos brėžinys pateikiamas Priedas 2.



2.6 pav. Papildomos tvirtinimo įrangos schema

Viršutinė tvirtinimo dalis ir apatinė tvirtinimo dalis susukamos tarpusavyje, prieš tai tarp jų įstačius bandinį. Taip standžiai įtvirtinamas ruošinys. Vienas šios įrangos galas paruoštas tvirtinimui į griebtuvus. Papildoma tvirtinimo dalis su vidiniu arba išoriniu sriegiu, įstatoma į griebtuvus bei įsukama į patį bandinį. Pagamintos bandymų įrangos nuotrauką galima matyti 2.7 paveikslėlyje.



**2.7 pav.** Pagaminta papildoma bandymų įranga

### **2.3. Ištraukimo jėgos matavimas**

Bandymas atliekamas tempimo-gniuždymo mašina „Tinius Olsen H10KT“ (2.8 pav.; [6]). Bandymo tipas – tempimo bandymas.

Šio bandymo metu bandinys įtvirtinamas į papildomą įrangą. Tempimo bandymo metu tvirtinimo detalė plešiama iš plieno lakšto statmena lakšto plokštumai kryptimi. Įtvirtinto bandinio nuotrauka (2.9 pav.)

Bandymo mašina automatiškai registruoja sukuriamą tempimo jėgą, todėl galima registruoti, ties kokia jėga bandinys trūksta. Taip pat bandymų mašina turi galimybę fiksuoti deformacijų priklausomybę nuo tempimo jėgos. Bandymai atliekami kambario temperatūros – 20°C sąlygomis.



**2.8 pav.** Bandymų mašina [6]



2.9 pav. Bandinys, įtvirtintas į tempimo-gniuždymo bandymų mašiną

Bandymo metu naudojami 2.10 paveikslėlyje pateikti parametrai. Svarbiausias jų – bandymo greitis (t.y. bandymų mašinos judėjimo greitis) – yra 5 mm/min.

Test Settings		
Batch Settings	Misc. Chamber	Product
Load Range N	7500	[100 - 10000]
Extension Range mm	50	[0.1 - 2000]
Test Speed mm/min	5	[0.001 - 500]
Gauge Length mm	55	[1 - 1000]
Approach Speed mm/min	5	[0.001 - 500]
Preload N	1	[0 - 1000]

2.10 pav. Bandymų mašinos nustatymo parametrai

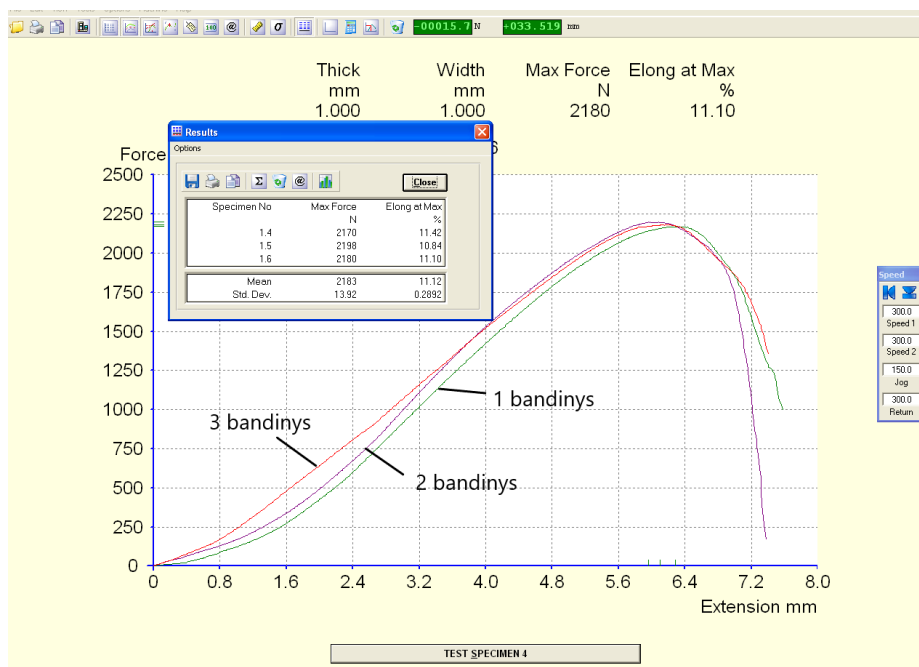
Prieš atliekant tempimo bandymus, buvo nufotografuoti visi pasiruošti bandiniai (2.11 pav.)



2.11 pav. Visi bandiniai prieš bandymus

### 2.3.1. Ištempimo jėgos matavimų rezultatai

Bandymų metu kompiuterine programa gautų rezultatų pavyzdys pateiktas 2.12 paveikslėlyje. Čia galime matyti bandinio numerį, maksimalią tempimo metu pasiektą jėgą niutonais bei griebtuvų pozicijos pasikeitimą milimetrais. Šiuos rezultatus matome tiek atskiriems bandiniams, tiek suvidurkintas reikšmes. Taip pat matome jėgos kitimo grafiką deformacijos atžvilgiu.



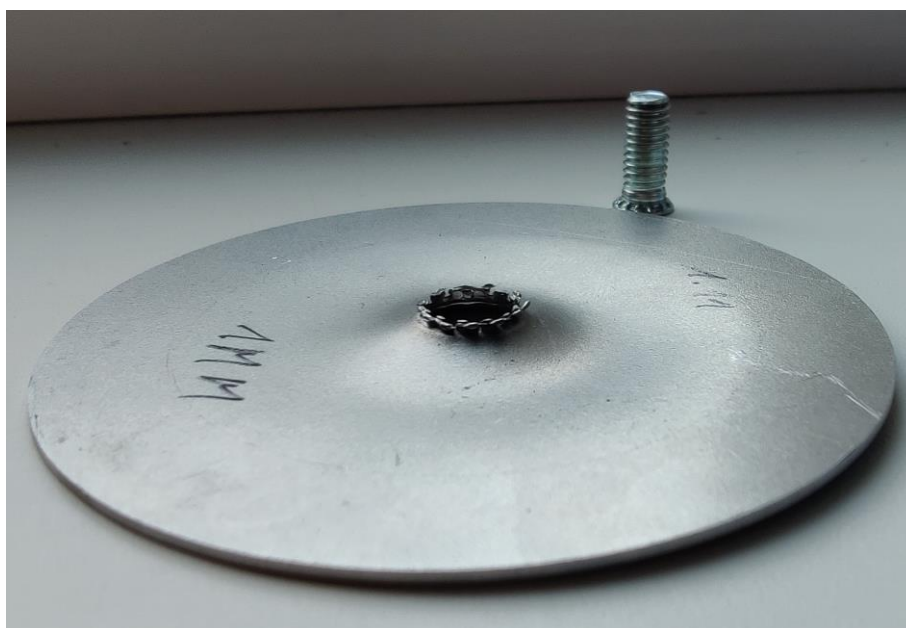
2.12 pav. Bandymų mašinos programinės įrangos rezultatų pateikimas

Alikus tempimo bandymus buvo matomas tipiškas konstrukcijų jungčių suirimas. Ištraukiant įpresuotą veržlę iš plokštelės užfiksuotos pasipriešinimo jėgos buvo gerokai mažesnės nei ištraukiant įpresuotą varžtą (2.2 lentelė). Todėl plokštelėje, iš kurios buvo išplėsta įpresuota veržlė plika akima

nepastebimos liekamosios deformacijos (2.13 pav.). Išplešiant įpresuotą varžtą, liekamosios deformacijos plokštelėje yra gerokai didesnės. Tokios plokštelės deformacijų vaizdą galima matyti 2.14 paveikslėlyje.



**2.13 pav.** Tipiškas jungties su varžle suirimas



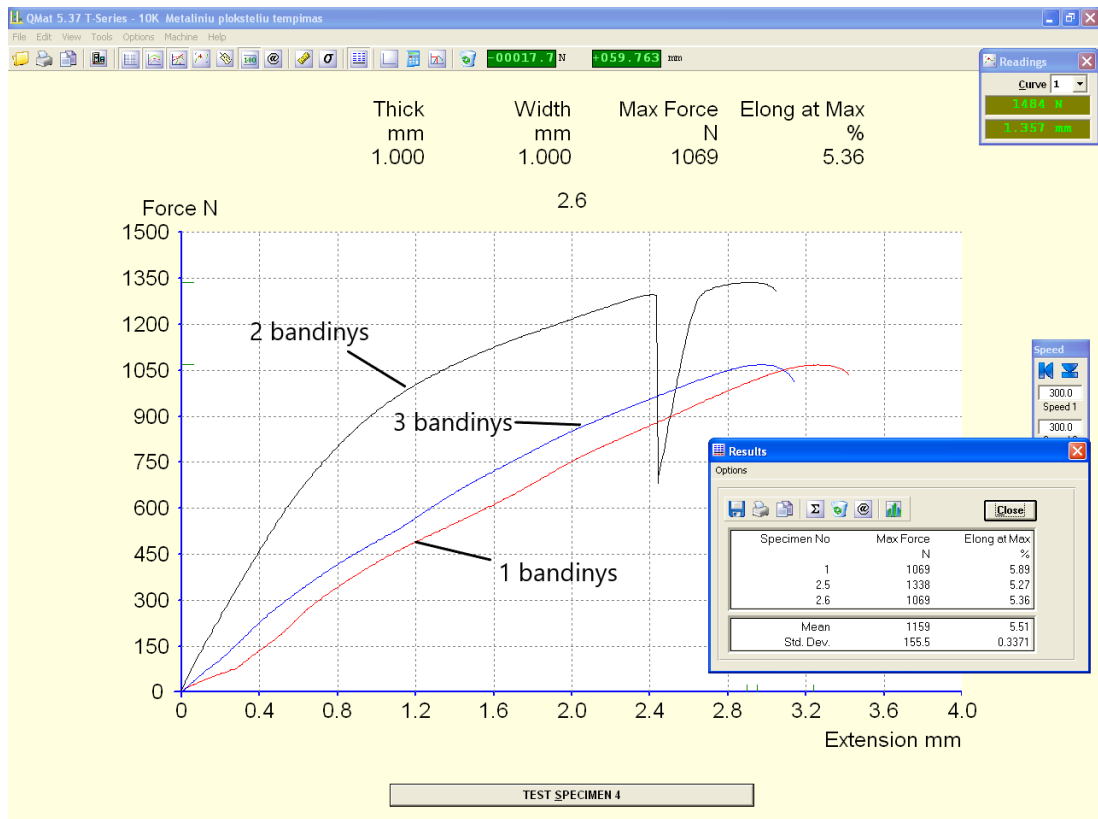
**2.14 pav.** Tipiškas jungties su varžtu suirimas

Bandymų rezultatų suvestinė parodyta 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Tempimo bandymų rezultatų suvestinė.

Eil. Nr.	Metalas	Storis	Tvirtinimo detalė	Ištraukimo jėgos dydis, N			Vidurkis	Standartinis nuokrypis
				Bandinys Nr. 1	Bandinys Nr. 2	Bandinys Nr. 3		
1	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS NUT S M6 0 ZN (D8.8)	542	541	527	537,0	8,02
2	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS NUT S M4 1 ZN (D5.4)	514	615	N/A	564,0	71,6
3	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	2260	2378	2338	2325,0	59,7
4	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	2170	2198	2180	2183	13,92
5	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	1069	1338	1069	1159,0	155,5
6	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	1322	1464	1305	1364	87,4
7	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	4305	4200	4180	4228,0	67,1
8	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	3308	3240	3324	3291,0	44,59
9	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT ARB M6 008 ZN (D9.7)	3048	3056	3064	3056	8
10	Sheet AL H22	1.5	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	875	886	837	866,0	25,71
11	Sheet AL H22	1.5	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	2584	2624	2592	2600,0	21,17
12	Sheet AISI 304 2B	1.5	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	1490	1431	1616	1512,0	94,4
13	Sheet AISI 304 2B	1.5	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	6953	6518	6623	6698,0	227
14	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	1568	1732	1262	1521,0	238,8
15	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	1608	1694	1654	1652	43,03
16	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	5873	5850	6030	5918	98,1
17	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	4225	4285	4270	4260	31,22

Tempimo bandymo metu programinės įrangos užfiksuotas rezultatų standartinis nuokrypis tarp skirtingų vienos konfigūracijos bandinių leidžia susidaryti vaizdą, kad tokios jungties sudarymo (presavimo) procesas nėra stabilus, taip pat šios jungties patikimumą lemiantys veiksniai gali ženkliai skirtis. 2.12 paveikslėlyje užfiksuota maža bandinių parametrų sklaida, standartinis nuokrypis 13,92 – ištraukimo jėga skiriasi neženkliai, o jėgos priklausomybė nuo bandinio deformacijos yra koreliuojanti visiems trimis bandiniams. Tačiau kai kurioms bandinių konfigūracijoms pastebima žymiai didesnė parametrų sklaida. 2.15 paveikslėlyje pavaizduotai bandinio konfigūracijai užfiksuotas standartinis nuokrypis 155,5.

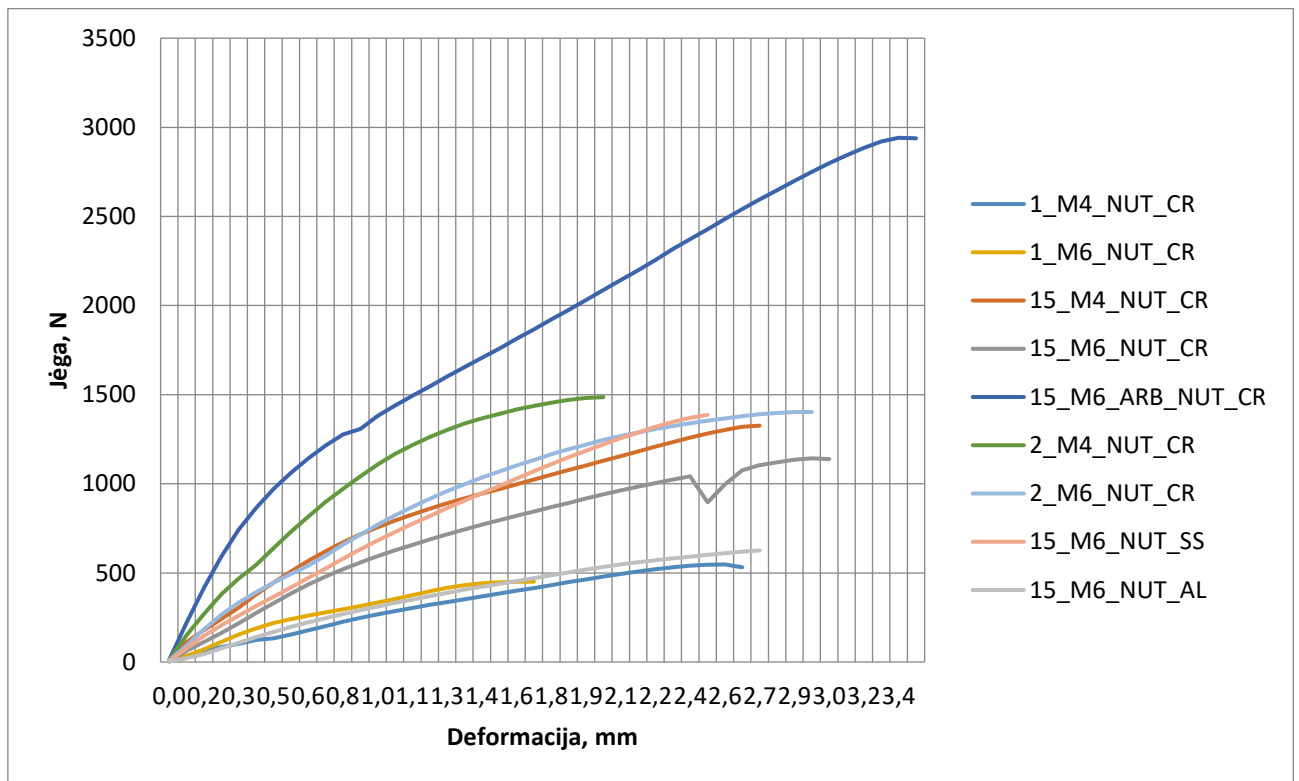


2.15 pav. Tempimo bandymų rezultatai su didele parametrų sklaida

Visų tempimo bandymų rezultatai grafiškai pateikiami 4 priede su išvesta papildoma kreive, sudaryta išvedus atskirų bandinių rezultatų vidurkius. Į šias kreives atsižvelgsime lygindami bandymų rezultatus su baigtinių elementų analizės rezultatais.

Grafinis visų rezultatų palyginimas pavaizduotas 2.16 ir 2.17 paveikslėliuose. Bandinių grupės legendos šifravimas:

- Skaičius priekyje 1 reiškia, kad bandiniuose naudota 1 mm storio metalo lakštas; 15 – 1,5mm storio; 2 – 2 mm storio lakštas.
- M4 ar M6 nurodo tvirtinimo detalės metrinį sriegį
- NUT arba BOLT nurodo tvirtinimo detalės tipą. ARB\_NUT – sustiprinta veržlės tipo detalė
- Paskutinis žymuo nurodo lakšto metalą: CR – šaltai valcuotas plienas, AL – aliuminis, SS – nerūdijantis plienas.



**2.16 pav.** Presuojamų veržlių bandinių tempimo jėgos priklausomybė nuo deformacijos

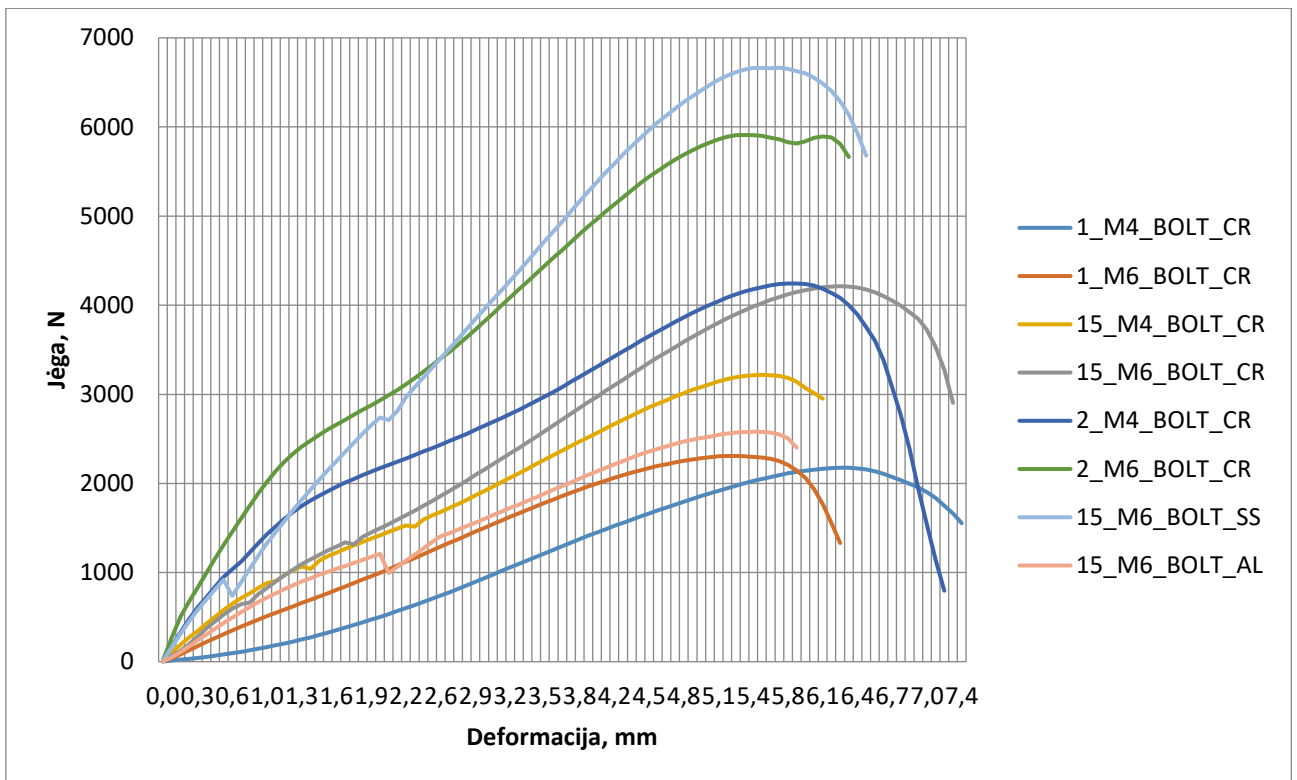
2.16 paveikslėlyje parodytas palyginimas tarp skirtingų bandinių su veržlės tipo tvirtinimo detalėmis. Galima pastebėti, kad kuo didesnis metalo storis, tuo didesnę apkrovą atlaiko jungtis. Tačiau skirtumai tarp skirtingo metrinio sriegio tvirtinimo detalių reikšmingos įtakos jungties stiprumui neturi.

Taip pat bandymo metu pastebėta ženkli sustiprintos „ARB“ tipo veržlės įtaka stiprumui. Jungtis su šia veržle atlaiko beveik dvigubai didesnes apkrovas nei su įprastine veržlė. Esant bandymuose aprašyti tvirtinimo detalių ištempimo kryptiniai darbai metu, galima teigti, kad šio tipo veržlės yra rekomenduotinos.

Žemiau pateiktame 2.17 pav. grafike galima matyti bandinių su varžtinėmis tvirtinimo detalėmis tempimo jėgų priklausomybę nuo deformacijos. Iš kreivių galima pastebėti, kad ženklią įtaką rezultatams turi tiek lakštinio metalo storis ir medžiaga, tvirtinimo detalės sriegis. Vis dėlto, didžiausią apkrovą atlaiko bandinys iš 1,5mm nerūdijančio plieno lakšto, kurio atlaikoma jėga yra didesnė nei 2 mm storio bandinio iš šaltai valcuoto plieno su M6 varžtu. Taip pat galima pastebėti didelį skirtumą tarp jau minėto 2 mm storio bandinio su M6 varžtu bei su M6 varžtu, kurių atlaikomos apkrovos skiriasi beveik trečdaliu.

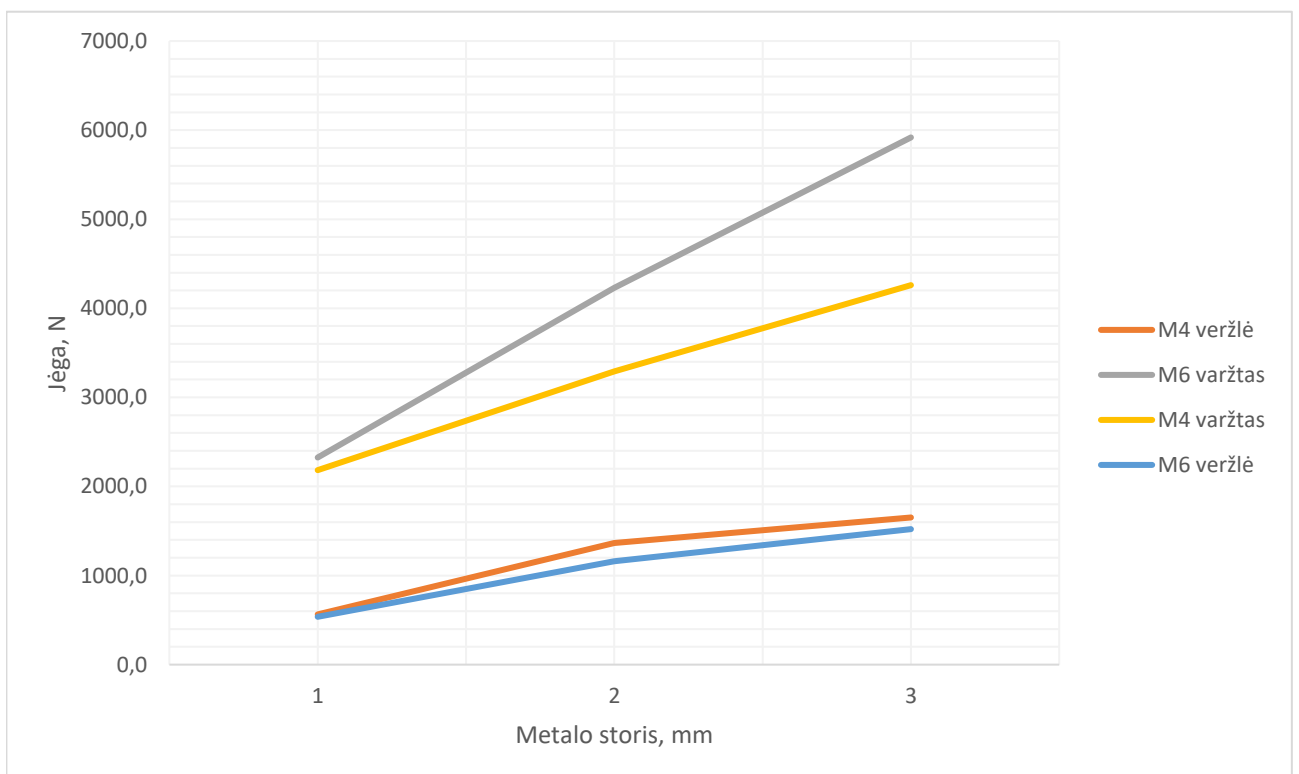
Iš 4 priede pateiktų atskirų bandinių kreivių taip pat galime pastebėti, kad bandiniai su įpresuotais varžtais pasižymi ženkliai labiau koreliuojančiais rezultatais nei bandiniai su įpresuotomis veržlėmis. Tą sąlygoja tempimo jėgos kryptis, kai ištempiamai veržlei užtenka tik prarasti kontaktą su plieno lakštu, o varžtinis sujungimas turi suardyti patį lakštinį plieną.





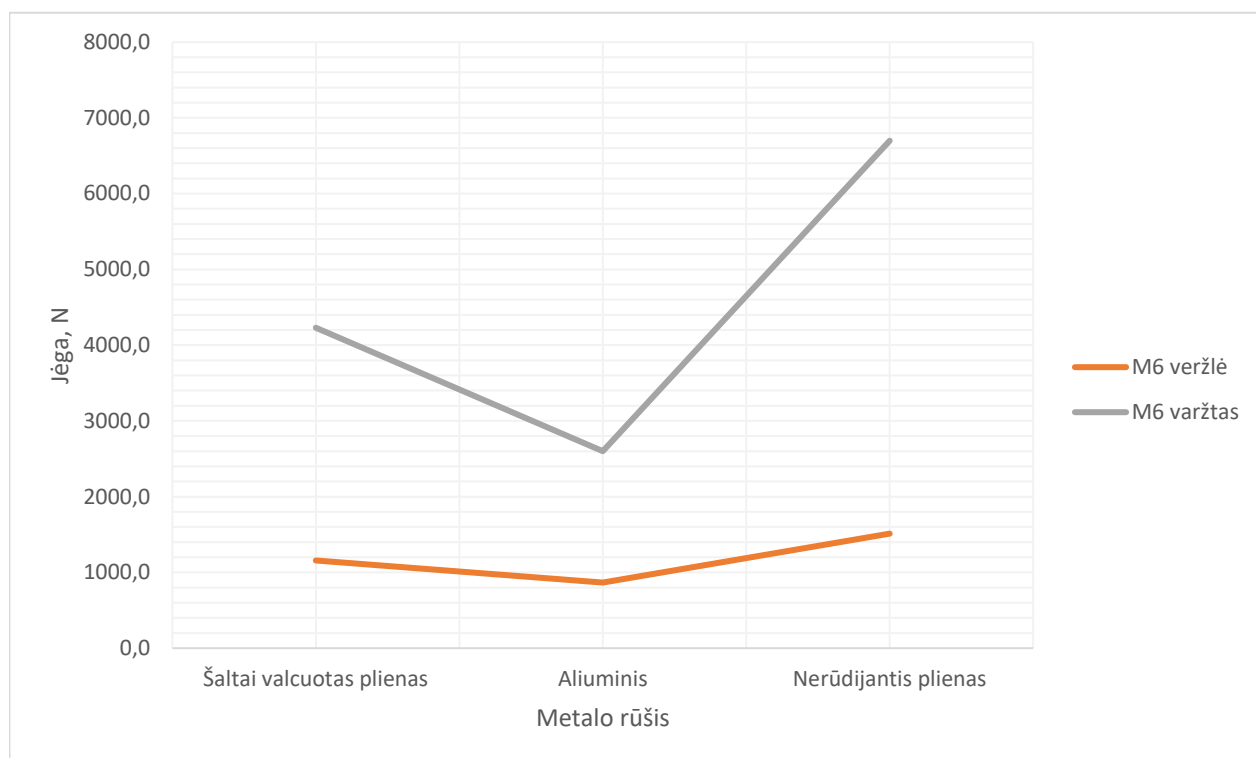
**2.17 pav.** Presuojamų varžtų bandinių tempimo jėgos priklausomybė nuo deformacijos

Atlikdami tempimo bandymų rezultatų analizę nagrinėsime juos šiais aspektais: bandinių atlaikomos tempimo jėgos skirtumus kintant metalo storiui, metalo rūšiai.



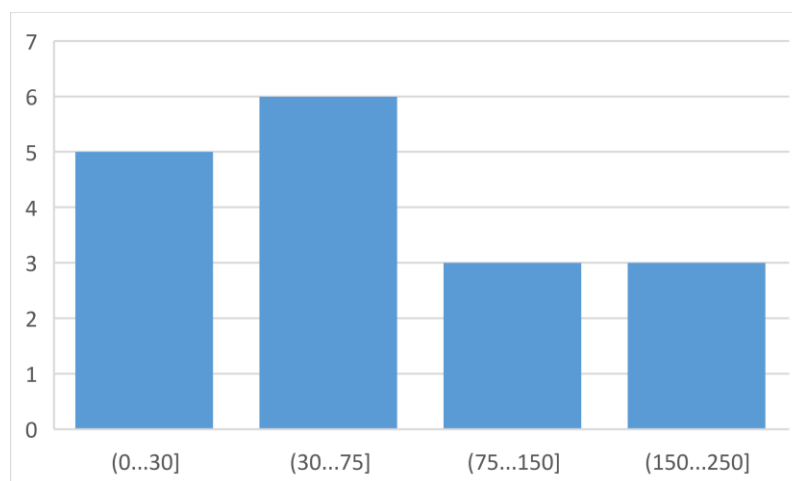
**2.18 pav.** Ištempimo jėgos palyginimas kintant metalo storiui

Iš gautų rezultatų (2.18 pav.) matome, kad didėjant plonalakščio plieno metalo storiui didėja ir jėga, reikalinga išplėsti tvirtinimo detalę iš metalo lakšto. Vis dėlto, didėjimas nėra tiesinis. Taip pat jungčiai su varžtu didesnė jėga yra atlaikoma esant didesnio dydžio sriegiui, t.y. M6 dydžio varžtas atlaiko didesnę apkrovą nei M4 dydžio sriegis. Tačiau jungčiai su veržle ši tendencija nėra pastebima ir abiejų dydžių veržlėm ištraukimo jėga yra beveik identiška. Tokį rezultatą gali sąlygoti mažas skirtumas tarp kontakto ploto bei pasirinkta veržlės ištraukimo kryptis.



**2.19 pav.** Ištraukimo jėgos priklausomybė nuo metalo rūšies

Vertinant skirtumus tarp metalų rūšių galima pastebėti (2.19 pav.), kad skirtumas tarp metalo rūšių yra ženkliai mažesnis, kai atliekamas bandymas jungtims su veržlėmis. Ištraukimo jėgos skirtumai žymiai padidėja analizuojant jungtį su varžtu. Jėgų pasiskirstymas yra natūraliai suprantamas: mažiausias apkrovą atlaiko aliuminio, didesnę šaltai valcuoto plieno, o didžiausią nerūdijančio plieno jungtis.



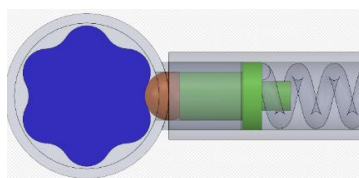
**2.20 pav.** Standartinių nuokrypių verčių pasiskirstymas

Bandymų metu programinės įrangos pagalba taip pat buvo įvertintas ir kiekvienos rūšies atskirų bandinių tempimo jėgos standartiniai nuokrypiai. Iš apibendrintos standartinių nuokrypių diagramos (2.20 pav.) galime pastebėti, kad penkios bandinių grupės turėjo mažą standartinių nuokrypį, dar šešios – vidutinį, o likusių šešių bandinių grupių standartiniai nuokrypiai buvo itin dideli. Tai parodo, kad jungtys su presuojamais komponentais yra galimai netolydžios, vertinant atlaikomą ištempimo jėgą. Nors dalis jungčių ir turi mažą sklaidą, tačiau nepastovus gamybinis procesas, galimos metalo lakštų parametrų nuokrypos sukuria papildomas rizikas, mažina tokių jungčių patikimumą.

#### 2.4. Prasukimo momento matavimas

Planuojamas atlikti eksperimentas yra gana paprastas – sukimo momento matavimas. Eksperimentą palengvina ir tai, kad sukimo momentas matuojamas ne besisukančiai detalei (pavyzdžiui velenui), tačiau nejudančiai detalei.

Sukimo momentą varžtams ir veržlėms lengviausia išmatuoti yra mechaniniu dinamometru. Mechaninio dinamometro schema pavaizduota (2.21 pav.; [10]). Matavimo schemos brėžinys pateiktas Priedas 3.



2.21 pav. Supaprastinta mechaninio dinamometro schema [10]

Mechaninio dinamometro veikimo principas paremtas trinties jėgos dydžio reguliavimu naudojant mechanines spyruokles. Regulatoriaus pagalba spyruoklės įtempiamos arba atleidžiamos, taip didinant arba mažinant trinties jėgą ties dviem tarpusavyje galinčiomis prasisukti detalėmis. Kol spyruoklės sukuriama trinties jėga geba priešintis sukimo momentui, mechaninis dinamometras veikia kaip įprastas veržliaraktis. Tačiau kai sukimo momento sukuriama jėga tampa didesnė, nei spyruoklės kuriama trinties jėga, mechaninis dinamometras prasisuka ir nebeleidžia pasukti varžto ar veržlės.

Norint atlikti prasisukimo momento matavimus, reikia mechaninio dinamometro regulatoriumi palaispniui didinti spyruoklės įtempimo jėgą tol, kol bandant prasukti varžtą arba veržlę bus prasukamas ne pats mechaninis dinamometras, tačiau prasisuks tvirtinimo detalė plonalakščiame pliene.

Šis būdas yra priimtinas savo praprastumu ir paplitimu, todėl eksperimento kaštai būtų maži bei nereikia daug papildomų žinių norint atlikti šį eksperimentą. Tačiau mechaninių dinamometrų tikslumas nėra didelis, taip pat sukimo momento vertes galima užfiksuoti tik tam tikru žingsniu. Taip pat eksperimento metu gali būti sunku tiksliai pastebėti ir įvardinti tą momentą, kai pradeda prasisukti tvirtinimo detalė.

Bandymams pasirinktas mechaninis dinamometras „TOPTUL ANAF0803“. Jo matavimo ribos yra 6-30 Nm. Matavimo paklaida  $\pm 4\%$ .



**2.22 pav.** Visi bandiniai, prieš prasukimo momento bandymą

Prasukimo momentui paruošti bandiniai matomi 2.22 paveikslėlyje. Į spaustuvus įtvirtinti bandiniai yra matomi 2.23 paveikslėlyje. Svarbu, kad bandinys būtų tinkamai įveržtas papildomoje tvirtinimo įrangoje, o pati įranga spaustuose, t.y. nejudamai. Presuojamų tvirtinimo detalių prasukimo momentai nėra dideli, todėl ši sąlyga buvo nesunkiai užtikrinama net ir mediniuose spaustuose.



**2.23 pav.** Įtvirtintas prasukimo bandinys

Atliekamas prasukimo jėgos bandymas palaipsniui didinant mechaninio dinamometro užveržimą iki tol, kol nebesuveikia dinamometrinio rakto apsaugos mechanizmas ir tvirtinimo detalės prasisuka plonalakščio plieno plokštelėje. Bandymo atlikimas pavaizduotas 2.24 paveikslėlyje.



**2.24 pav.** Prasukimo momento bandymo atlikimas

Atlikus bandymus gautas tipiškas jungties su varžle suirimas pavaizduotas 2.25 paveiklėlyje, o tipiškas jungties su varžtu suirimas 2.26 paveikslėlyje.

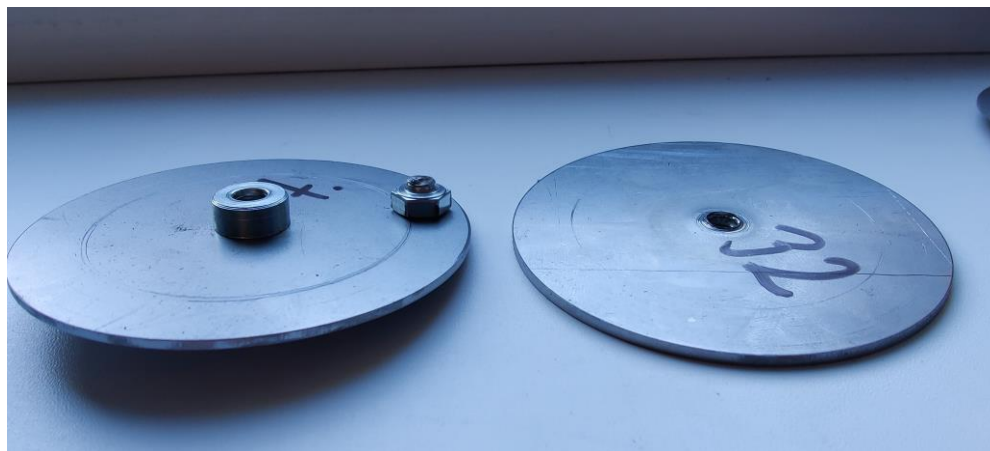


**2.25 pav.** Tipiškas jungties su varžle suirimas



**2.26 pav.** Tipiškas jungties su varžtu suirimas

Atliekant prasukimo momento bandymus buvo sugadinta nemažai bandinių dėl prasisukusio tvirtinimo detalių sriegio arba nulūžusių varžtų, kuriais buvo bandoma prasukti tvirtinimo elementą plokštelėje. Šie pavyzdžiai pavaizduoti 2.27 paveikslėlyje.



**2.27 pav.** Sugadinti bandiniai

Bandymų rezultatai pavaizduoti 2.3 lentelėje. Galime pastebėti, kad buvo matuotos jungtys tik su M6 dydžio tvirtinimo elementu. Tai atlikta dėl turimos įrangos matavimo ribų. Pagal gamintojų rekomendacijas M4 dydžio tvirtinimo elementai gali atlaikyti nuo 3 iki 7 Nm prasukimo momentą, o tokių parametrų išmatuoti negalime su „TOPTUL ANAF0803“ mechaniniu dinamometru, kurio matavimų ribos yra nuo 6 iki 30 Nm.

Atlikus matavimus, buvo pastebėta didelė parametrų sklaida tarp vienodos konfigūracijos bandinių, todėl šių bandymų rezultatai negali būti laikomi patikimi ir jais nebus remiantis atliekant baigtinių elementų analizę.

Pagrindines parametrų sklaidos priežastis galima išskirti šias:

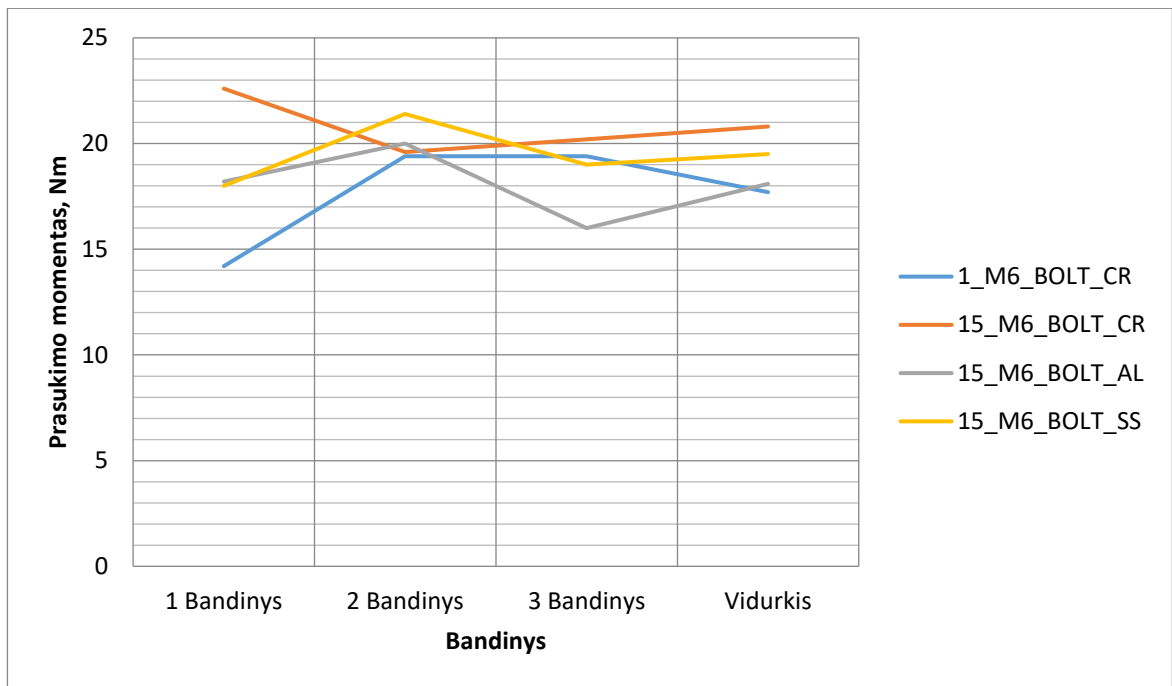
- Tvirtinimo detalių presavimo proceso netolygumas
- Metalų lakštų parametrų netolygumas
- Mažas kontakto plotas

Atskiri bandinių su varžtais ir su veržlėmis grafikai pavaizduoti 2.28 ir 2.29 paveikslėliuose. Laužtos kreivės rodo rezultatų netolygumą. Tolygiausi rezultatai pastebėti 1,5 mm storio šaltai valcuoto plieno lakštuose, tiek su veržlės tipo, tiek su varžto tipo tvirtinimo detalėmis. Taip pat galima pastebėti, kad jungčių su įpresuotais varžtais rezultatai yra artimi bei neženkliai priklausomi nuo metalo lakšto medžiagos, bei storio. Jungtyse su veržlėmis pastebimas žemesnis atlaikomas sukimo momentas bandiniams iš aliuminio lakšto bei 1 mm storio šaltai valcuoto plieno lakštui.

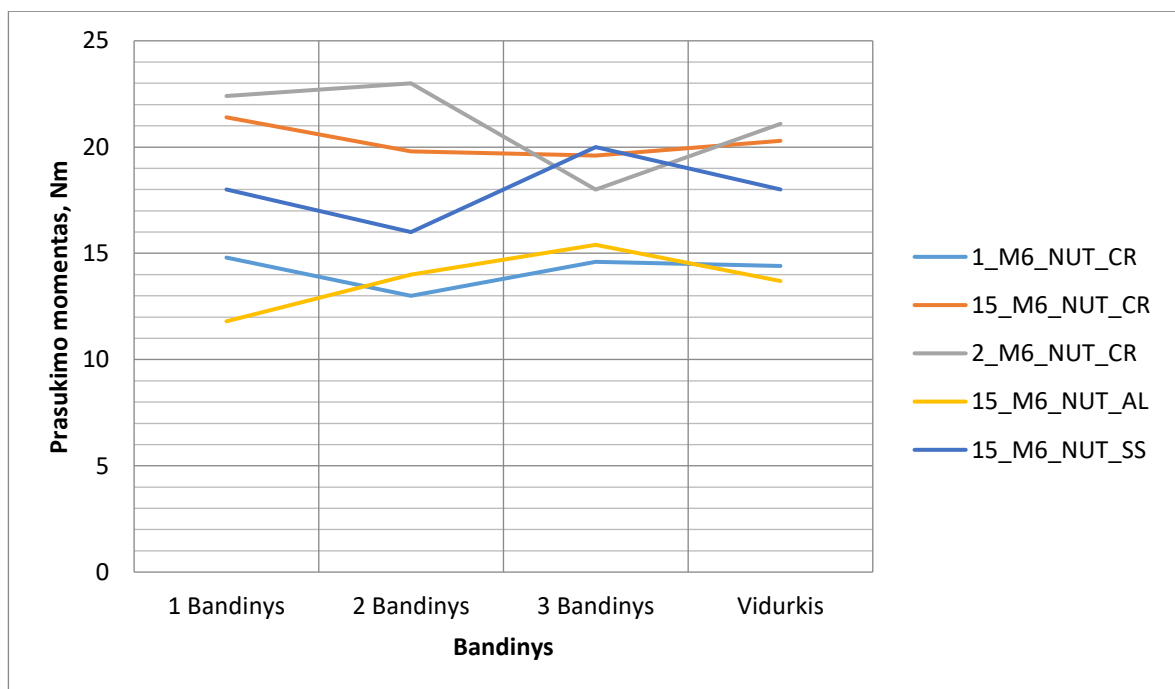
## 2.22 Prasukimo momento matavimų rezultatai

### 2.3 lentelė. Prasukimo momento matavimo rezultatai

Eil. Nr.	Metalas	Storis	Tvirtinimo detalė	Prasukimo momentai, Nm			Vidurkis
				Bandinys Nr. 1	Bandinys Nr. 2	Bandinys Nr. 3	
1	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS NUT S M6 0 ZN (D8.8)	14,8	13	14,6	14,1
2	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS NUT S M4 1 ZN (D5.4)	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	14,2	19,4	19,4	17,7
4	Sheet Cold roll DC01	1	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	21,4	19,8	19,6	20,3
6	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	22,6	19,6	20,2	20,8
8	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Sheet Cold roll DC01	1.5	PRESS NUT ARB M6 008 ZN (D9.7)	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Sheet AL H22	1.5	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	11,8	14	15,4	13,7
11	Sheet AL H22	1.5	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	18,2	20	16	18,1
12	Sheet AISI 304 2B	1.5	PRESS NUT CLS M6 1 A2 (D8.8)	18	16	20	18,0
13	Sheet AISI 304 2B	1.5	PRESS BOLT FHS M6X15 A2 (D6)	18	21,4	19	19,5
14	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS NUT S M6 1 ZN (D8.8)	22,4	23	18	21,1
15	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS NUT S M4 2 ZN (D5.4)	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS BOLT FH M6X15 ZN (D6)	N/A	N/A	N/A	N/A
17	Sheet Cold roll DC01	2	PRESS BOLT FH M4X10 ZN (D4)	N/A	N/A	N/A	N/A



2.28 pav. Bandinių su presuojamais varžtais prasukimo momento matavimo rezultatai



2.29 pav. Bandinių su presuojamomis veržlėmis prasukimo momento matavimo rezultatai

Trumpinių šifravimas:

- Skaičius priekyje 1 reiškia, kad bandiniuose naudota 1 mm storio metalo lakštas; 15 – 1,5mm storio; 2 – 2 mm storio lakštas.
- M4 ar M6 nurodo tvirtinimo detalės metrinį sriegį
- NUT arba BOLT nurodo tvirtinimo detalės tipą. ARB\_NUT – sustiprinta veržlės tipo detalė
- Paskutinis žymuo nurodo lakšto metalą: CR – šaltai valcuotas plienas, AL – aliuminis, SS – nerūdijantis plienas.

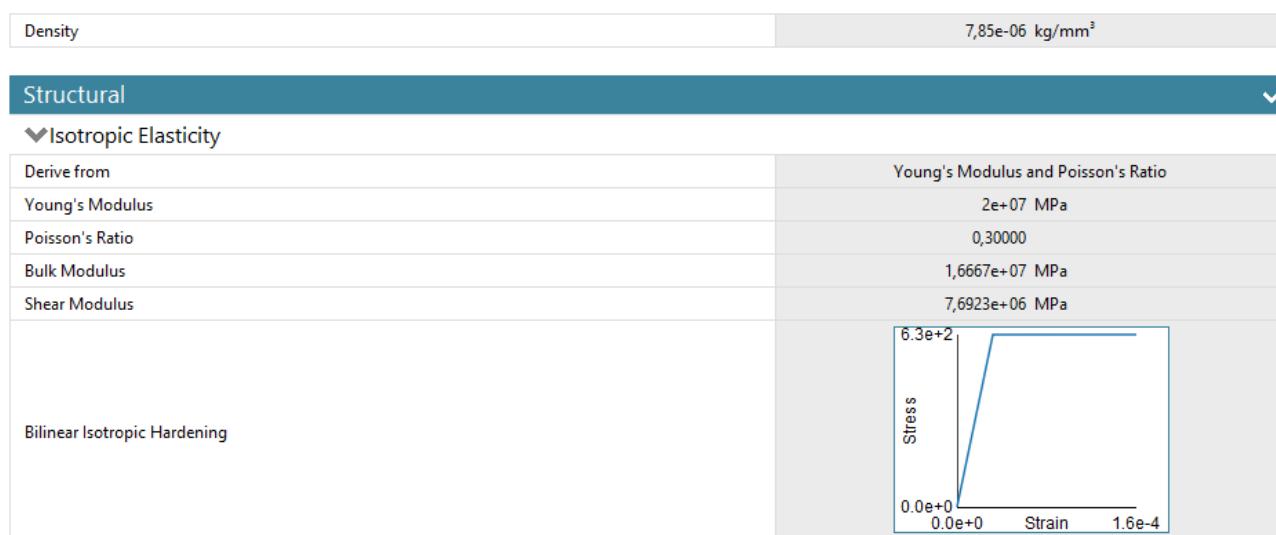


### 3. Skaitinis eksperimentas

#### 3.1. Skaičiuojamojo modelio aprašymas ANSYS aplinkoje

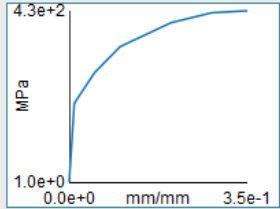
Aprašant baigtinių elementų modelį „Ansys workbench 19.2“ aplinkoje, buvo naudojama „Static analysis“ skaičiavimų terpė. Ši terpė pasirinkta dėl dažniausiai pasitaikančių apkrovų tipo tvirtinimo detalėms plonalakščiame pliene.

Presuojamo komponento medžiagos aprašymui pasirinktas „Isotropic elastic“ modelis (3.1 pav.), nes po eksperimentinių bandymų nei presuojamame varžte, nei presuojamoje veržlėje plika akimi nebuvo matoma liekamųjų deformacijų. Taip pat skaičiuojamojo tyrimo metu nustatyta, kad tiksliausi rezultatai gaunami, kai presuojamos detalės medžiagai suteikiamas papildomas standumas – Jungo modulis padidintas 100 kartų lyginant su įprastiniu konstrukciniu plieniu. Taip pat medžiagos savybėms geriau aprašyti panaudota „Bilinear Isotropic Hardening“ savybė, pateikiama ANSYS medžiagų bibliotekoje prie netiesiškai deformuojamo konstrukcinio plieno savybių. Medžiagos parametrus galima matyti 3.1 paveikslėlyje.



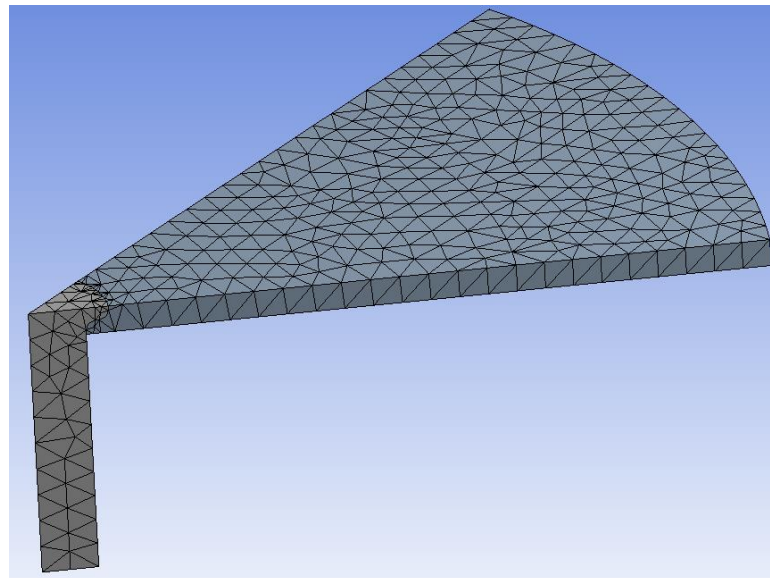
3.1 pav. Presuojamo varžto medžiagos aprašymas

Metalo lakšto aprašymui pasirinktas „Plasticity“ medžiagos aprašymo modelis (3.2 pav.). Šis medžiagos aprašymo modelis pasirinktas, nes bandymų metu metalo lakštai turėjo liekamąsias plastines deformacijas. Plastinės savybės aprašytos „Multilinear isotropic hardening“ funkcija – aproksimuota tiesėmis su kritiniais taškais. Medžiagos takumo riba – 198 MPa, nustatyta metalo tiekėjo ir patvirtinta sertifikatu.

Density	7,85e-06 kg/mm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,49000
Bulk Modulus	3,3333e+06 MPa
Shear Modulus	67114 MPa
Multilinear Isotropic Hardening	
Tensile Yield Strength	198,00 MPa

**3.2 pav.** Šaltai valcuoto plieno lakšto medžiagos aprašymas

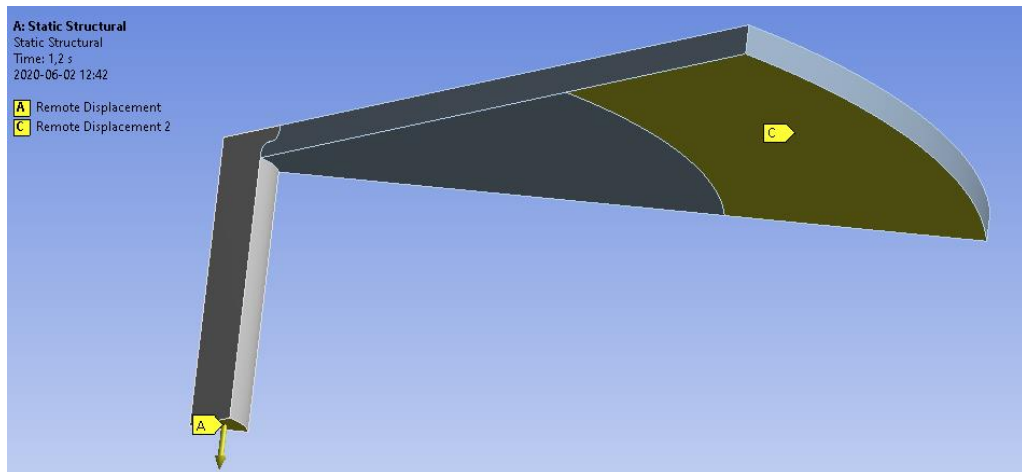
Kuriant modelį sudarytas geometrinis jungties modelis, jam sukurtas baigtinių elementų tinklelis (3.3 pav.). Šį tinklelį sudaro 2727 elementai ir 5414 mazgų. Tinklelio elemento tipas – tetraedriniai elementai. Svarbu paminėti, kad dėl didelių plastinių deformacijų, tinklelio smulkinimas nepadeda, o priešingai, neleidžia atlikti skaičiavimų.



**3.3pav.** Skaičiuojamojo modelio baigtinių elementų tinklelis

Kontaktas tarp varžto ir plokštelės aprašomas kaip trinties („friction“) kontaktas, kurio trinties koeficientas yra 0,9.

Skaičiavimams pasitelktame modelyje naudota viena aštuntoji bandinio dalis, kuriai uždėta ašinė simetrinė priklausomybė. Modelio įtvirtinimus matote 3.4 pav. Plokštelės kraštai įtvirtinti nejudamai statmenai plokštei ašiai, o varžto gale užduotas poslinkis.



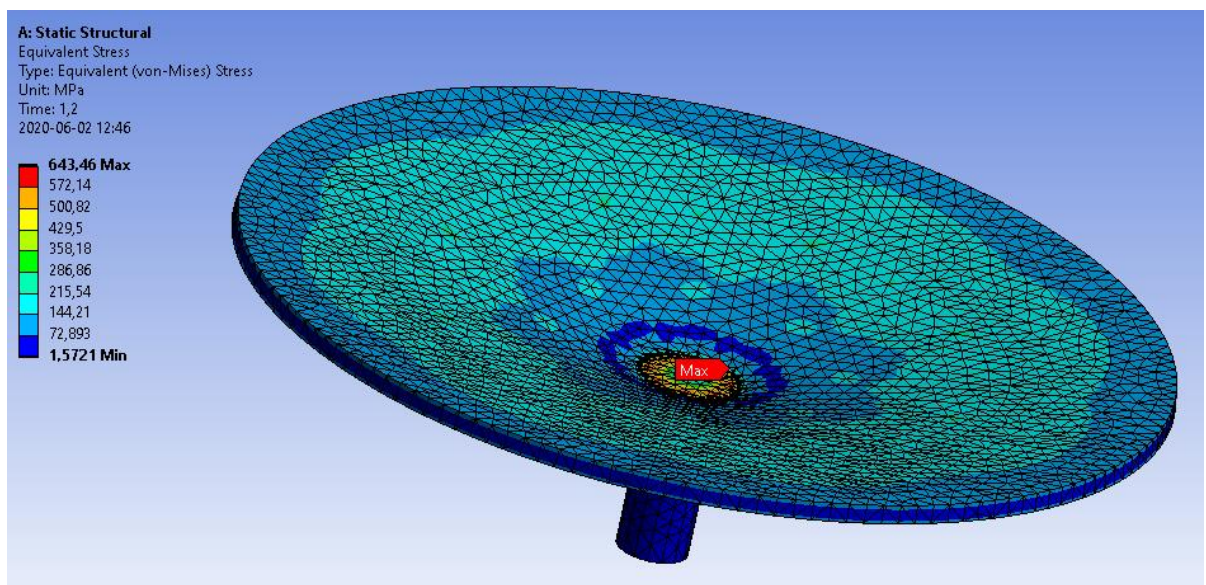
**3.4 pav.** Skaičiuojamo modelio kraštinės sąlygos

Šis skaičiuojamasis modelis tinkamai skaičiuoja tik prie pakankamai nedidelių plastinių deformacijų, t.y. viršijus plokštelės storį, skaičiavimų rezultatai nebėra gaunami, dėl pasikeitusio kontakto ploto, trinties koeficiento bei galimo medžiagų suirimo.

### 3.2. Rezultatų palyginimas

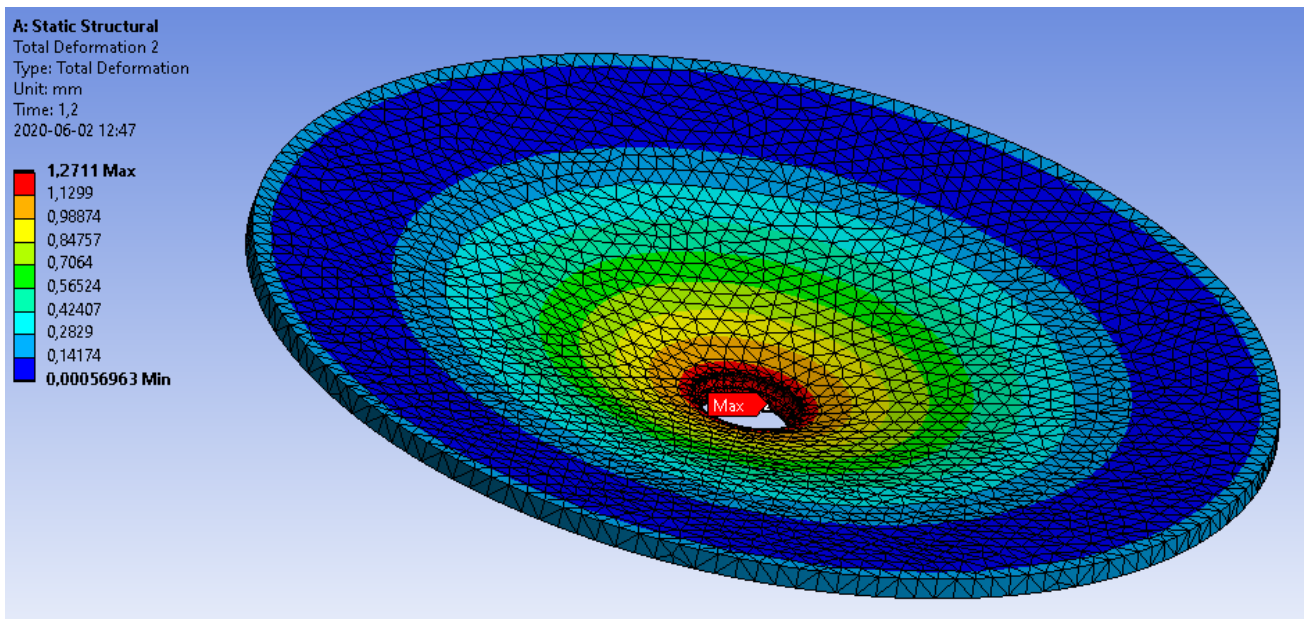
ANSYS programa gauti rezultatai lyginami su analogiškais eksperimentinio tempimo bandymo. Šiuo atveju palyginsime bandinį, sudarytą iš šaltai valcuoto plieno 1,5 mm storio plokštelės su varžtine tvirtinimo detale. Užduotas varžto galo plokštumos poslinkis – 1,2 mm. Toks poslinkis yra maksimalus, kurį galima apskaičiuoti netiesinės statinės analizės būdu ANSYS programoje pagal nurodytus parametrus. Didinant užduotą pradinį poslinkį šis modelis tampa nebetinkamas skaičiavimams, nes skaičiuojant baigtinių elementų metodu nebeišlaikoma jėgų konvergencija.

Sumodeliuotos jungties Von Mises įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 3.5 pav. Įtempiai siekia varžto medžiagos takumo ribą.

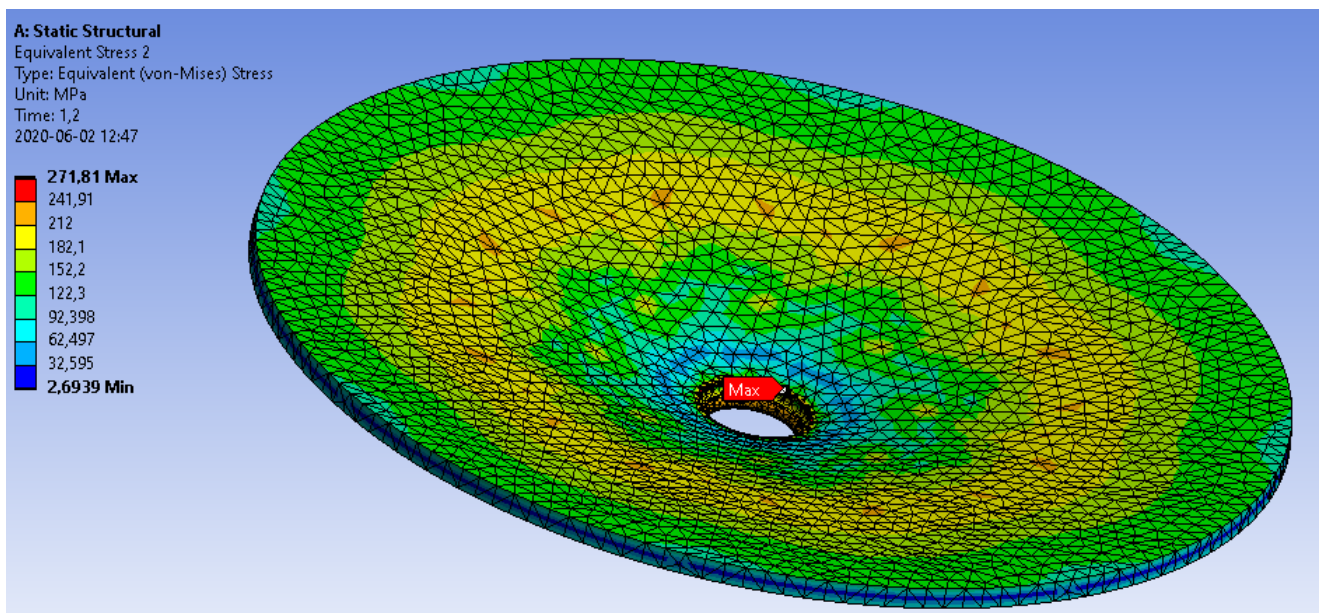


**3.5 pav.** Jungties Von Mises įtempių vaizdas

Didžiausios deformacijos, atsiranda šaltai valcuoto plieno plokštelėje, todėl jos įtempių (3.6 pav.) ir deformacijų vaizdai (3.7 pav.) išskirti atskirai. Matome, kad plokštelės maksimalios deformacijos reikšmės statmena plokštumai kryptimi yra artimos užduotam pradiniam poslinkiui.



3.6 pav. Plokštelės deformacijų vaizdas



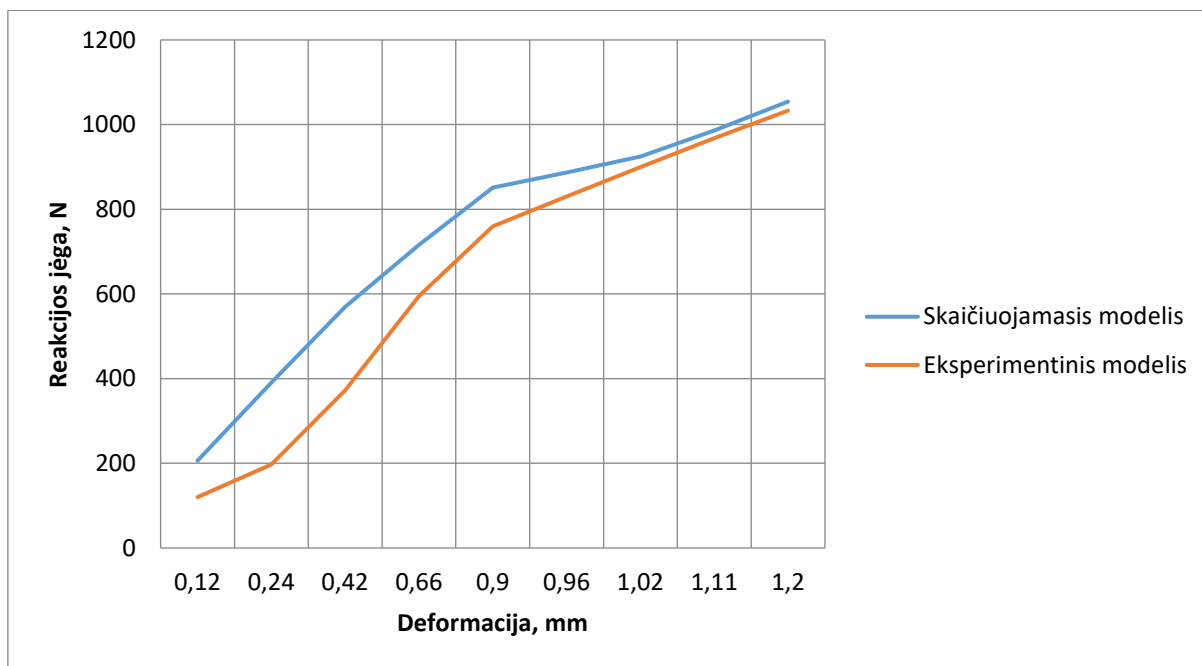
3.7 pav. Plokštelės Von Mises įtempių vaizdas

Plokštelėje susidarantys maksimalūs įtempiai viršija plokštelės medžiagos takumo ribą (198 MPa), todėl vyksta plastinė deformacija. Medžiagos stiprumo ribos (430 MPa) šie įtempiai dar neviršija.

Toliau reakcijos jėgų įtvirtinime palyginimas su eksperimentiniais rezultatais. 3.1 lentelėje galima matyti skaitinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų vertes, jų procentinį skirtumą. Šios vertės taip pat pavaizduotos 3.8 pav. esančiame grafike.

### 3.1 lentelė. Skaitinio ir eksperimentinio tyrimo reakcijos jėgų palyginimas

Deformacija, mm	Reakcijos jėga, N		Skirtumas, %
	Skaičiuojamasis modelis	Eksperimentinis modelis	
0,12	206,18	120	42%
0,24	390,89	197	50%
0,42	568,88	372	35%
0,66	715,72	595	17%
0,9	850,94	760	11%
0,96	886,7	830	6%
1,02	924,35	900	3%
1,11	985,61	968	2%
1,2	1054,4	1033	2%



3.8 pav. Reakcijos jėgų palyginimas

Galime pastebėti, kad esant mažoms deformacijoms, skirtumai yra dideli (siekia 50%), tačiau pereinant į didesnės plastinės deformacijos zoną (0,9-1,2 mm) šie skirtumai beveik išnyksta ir galiausiai neviršija 5%.

Tokio santykio tarp reakcijos jėgų priežastys gali būti kelios:

- Paklaidos pradinėje eksperimentinio bandymo stadijoje, kai pradamas tempti bandynis dar turi laisvumo griebtuose.
- Baigtinių elementų tinklelio ir geometrijos netikslumai bei supaprastinimai skaitiniame modelyje.

### 3.3. Modelio pritaikymas

Išsikeliant darbo tikslą buvo tikimasi skaitinį modelį pritaikyti dvejopai:

1. Nustatyti kritines deformacijas bei veikiančias jėgas analogiškiems bandiniams turintiems kitus parametrus (lakštinio metalo storio, skirtingo dydžio tvirtinimo detalių).
2. Atlikti patikrinamuosius konstrukcijų skaičiavimus.

Iš gautų rezultatų, galime matyti, kad sukurtas skaičiuojamasis modelis veikia tik ribotoje plastinių deformacijų zonoje. Dėl šios priežasties, negalima šio skaičiuojamojo modelio pritaikyti pirmajam punktui. Norint nustatyti jungties atlaikomą ašinę tempimo jėgą, plokštelės patiria deformacijas, kelis kartus didesnes nei gali apskaičiuoti duotasis modelis.

Skaičiuojamasis modelis veikia tik mažoje plastinių deformacijų srityje, tačiau projektuojant konstrukcijas su tokiomis lakštinio plieno bei tvirtinimo detalių jungtimis, dažniausiai ir nenorima viršyti šių deformacijų. Todėl šis modelis iš esmės yra tinkamas atlikti patikrinamiesiems konstrukcijų skaičiavimams, kol plastinės deformacijos neviršija maždaug 80% lakšto metalo storio vertės.

## Išvados

Darbo metu buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių rezultatai buvo išanalizuoti nustatant jungčių tarp plieno lakštų ir tvirtinimo elementų priklausomybes.

1. Atlikus gaminių iš plonalakščio plieno su presuojamais tvirtinimo elementais analizę, nustatytos šios svarbiausios jungčių charakteristikos: tvirtinimo elemento ištraukimo jėga ir prasukimo momentas.

2. Atlikta gaminių analizė, kurios metu nustatyti bandinių geometriniai parametrai: 25mm atstumus nuo tvirtinimo elemento centro iki artimiausio įtvirtinimo taško. Taip pat nustatyta, kad dažniausiai naudojami yra M4 ir M6 dydžio sriegių presuojami komponentai, kuriems ir buvo atlikti tyrimai. Bandymams pasirinktos medžiagos: šaltai valcuoto plieno, aliuminio bei nerūdijančio plieno lakštai.

3. Atlikti tempimo bandymai, kurių metu nustatytos jungčių atlaikomos ašinės apkrovos jėgos, nustatyta jų priklausomybė nuo deformacijos. Bandymų rezultatai išanalizuoti, nustatant didesnę atlaikomą apkrovą M6 dydžio jungtims su varžtais nei M4 dydžio analogiškomis jungtims. Tačiau nepastebėta svaraus skirtumo tarp M4 ir M6 dydžio jungčių su veržlėmis: priklausomai nuo storio atlaikomos jėgos skiriasi 5-15%. Taip pat gauti 1,5mm storio lakštų bandinių rezultatai leidžia teigti, kad mažiausias apkrovas atlaiko jungtys iš aliuminio (veržlė 866 N, varžtas 2600 N), didesnes iš šaltai valcuoto plieno (veržlė 1159 N, varžtas 4228 N), o didžiausias apkrovas jungtys iš nerūdijančio plieno (veržlė 1512 N, varžtas 6698 N). Vertinant veržlių tempimą bandyme nurodyta kryptimi, rekomenduojama naudoti pastiprintą veržlę, kuri atlaiko iki vidutiniškai 3056 N ištempimo jėgą. Įvertinus gautų rezultatų sklaidą, nustatytas mažas standartinis nuokrypis ištempimo jėgai 5-ioms bandinių grupėms, vidutinis – 6-ioms, didelis taip pat 6 bandinių grupėms.

4. Prasukimo momento bandymai atlikti tik daliai bandinių grupių – detalėms su M6 sriegio tvirtinimo detalėmis. Joms nustatytos prasukimo momento vertės, kuriomis galima remtis projektuojant konstrukcijas arba pritaikant skaičiuojamajam modeliui. Bandiniams su varžtinėmis tvirtinimo detalėmis prasukimo momentai svyruoja nuo 17,7 Nm (1 mm storio šaltai valcuotam plienui) iki 20,8 Nm (1,5 mm storio šaltai valcuotam plienui). Bandiniams su varžtinėmis tvirtinimo detalėmis prasukimo momentai yra labiau priklausomi nuo plokštelės storio bei medžiagos ir svyruoja nuo 13,7 Nm (1,5 mm storio aliuminiui) iki 21,1 Nm (2 mm storio šaltai valcuotam plienui).

5. Sudarytas skaičiuojamasis modelis „Ansys workbench 19.2“ programinėje aplinkoje, tinkamas tirti plastines deformacijas, kurios neviršija 80% bandomosios plokštelės storio. Sulyginus rezultatus su eksperimentiniais, gauti dideli (35-50%) skirtumai tiesinės ir mažos plastinės deformacijos metu, tačiau plastinių 0,9-1,2mm plastinių deformacijų metu, šis skirtumas sumažėjo nuo 11 iki 2 procentų. Šios ribos aprašo tiksliausio skaičiuojamojo modelio veikimo zoną.

## Literatūra

1. A. Eitutis. Eksperimentinė mechanika. - Kaunas, KTU, "Technologija", 1998.
2. C.F. Jeff Wu, Michael S. Hamada, Experiments : planning, analysis, and optimization / 2nd ed. Hoboken [N.J.] : Wiley, 2009. xxix, 716 p.
3. PSM International „Sheet metal fasteners“ katalogas. 48p.
4. HAEGER presavimo mašinų produktų tinklapis [interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-05-17]. Prieiga internete: <https://www.haeger.com/Products>
5. Serverinės spintos [interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-05-17]. Prieiga internete: <https://www.mosaicdataservices.com/colocation/rackspace-server-cabinets-cages/>
6. Prieiga per internetą: <https://www.iitk.ac.in/smc/images/page-images/utm-1.jpg> [Žiūrėta 2020-01-16]
7. Prieiga per internetą: <https://trfastenings.blob.core.windows.net/sitecontent/42b324dc156445bab9f0e985320344f0.pdf> [Žiūrėta 2020-01-16]
8. Prieiga per internetą: [https://www.pemnet.com/fastening\\_products/pdf/cldata.pdf](https://www.pemnet.com/fastening_products/pdf/cldata.pdf) [Žiūrėta 2020-01-16]
9. Prieiga per internetą: [https://www.pemnet.com/fastening\\_products/pdf/fhdata.pdf](https://www.pemnet.com/fastening_products/pdf/fhdata.pdf) [Žiūrėta 2020-01-16]
10. Prieiga per internetą: [https://en.wikipedia.org/wiki/Torque\\_wrench](https://en.wikipedia.org/wiki/Torque_wrench) [Žiūrėta 2020-01-16]
11. Prieiga per internetą: <https://www.iitk.ac.in/smc/images/page-images/utm-1.jpg> [Žiūrėta 2020-01-16]
12. Prieiga per internetą: <https://apcis.ktu.edu/MIDF/lt/site/katalogas?more=8870> [Žiūrėta 2020-01-16]
13. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/179/1/012024/pdf> [Žiūrėta 2020-05-17]

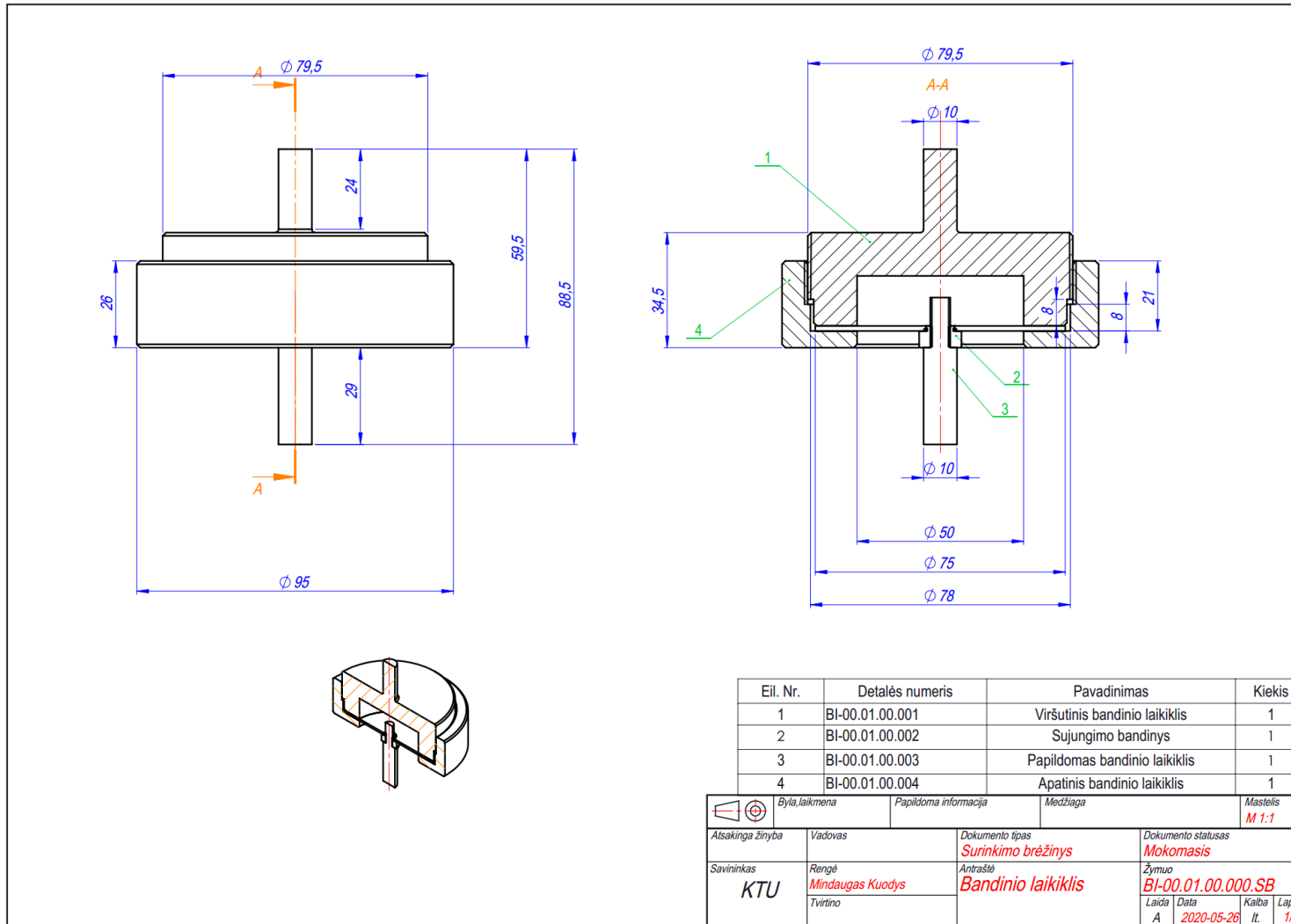


## Priedai

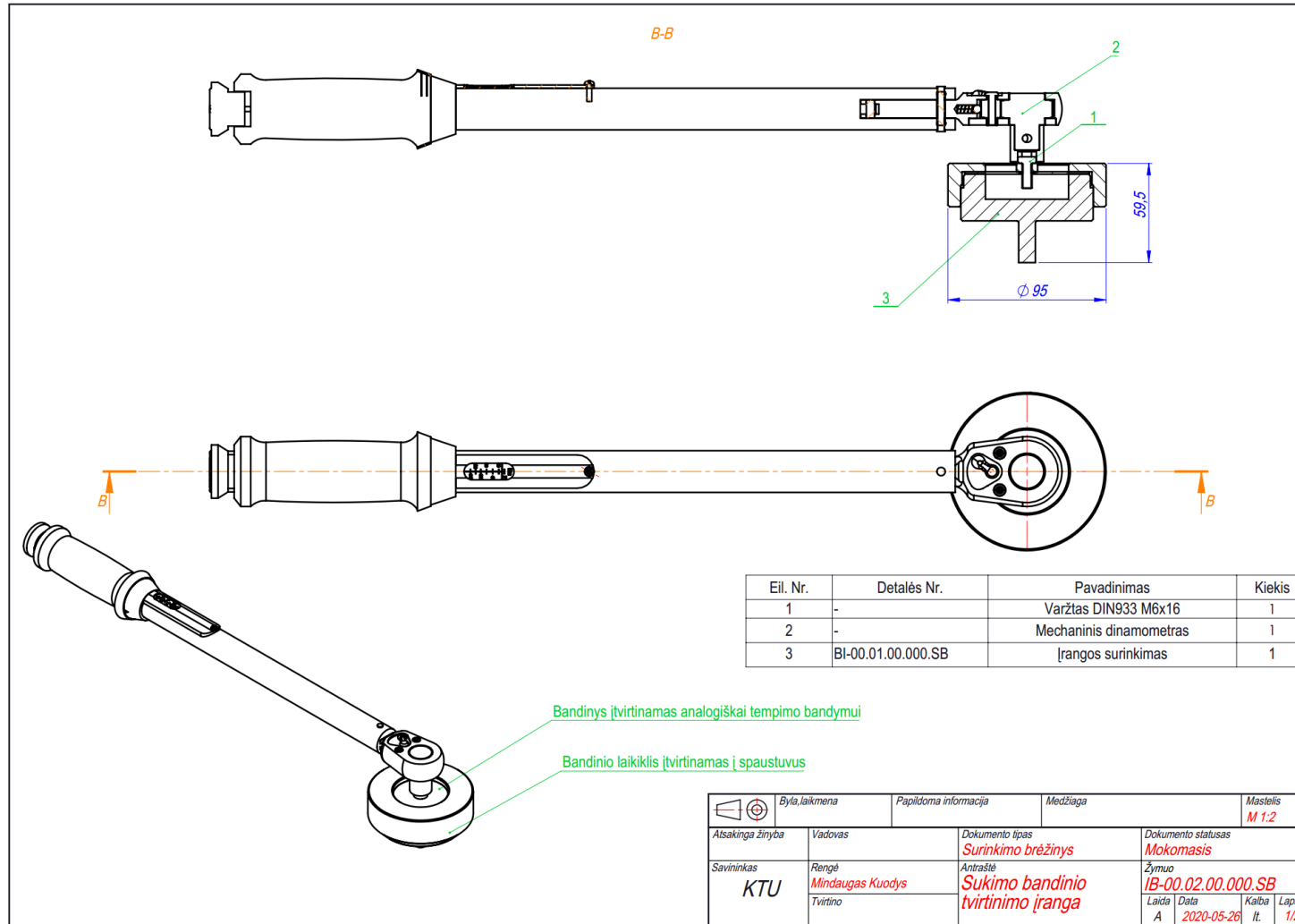
### 1 priedas. Bandinių parametrų analizės suvestinė

Vidutinio atstumo iki detalės kraštinės arba lenkimo matavimo rezultatų suvestinė										
Eilės Nr.	Detalės tipas	Komponentas 1	Vidutinis komponentas 1 atstumas, mm	Komponento 1 kiekis, vnt	Komponentas 2	Vidutinis komponentas 2 atstumas, mm	Komponento 2 kiekis, vnt	Komponentas 3	Vidutinis komponentas 3 atstumas, mm	Komponento 3 kiekis, vnt
1	Rėmas	M6	15	5						
2	Dėžė	M6	30	2	M5	32	2	M8	12	1
3	Duryš	M4	18	8	M6	41	2			
4	Dėžė	M5	30	3						
5	Rėmas	M6	20	12						
6	Dėžė	M4	33	4						
7	Dėžė	M3	15	4						
8	Rėmas	M5	20	6						
9	Kita	M6	17	2						
10	Kita	M6	36	7						
11	Duryš	M6	22	9	M4	32	8			
12	Dėžė	M4	12	16						
13	Dėžė	M5	25	2						
14	Dėžė	M6	46	8	M8	18	2	M4	35	2
15	Dėžė	M6	58	2						
16	Duryš	M4	25	4						
17	Kita	M5	24	26						
18	Duryš	M5	100	8						
19	Rėmas	M5	10	2						
20	Dėžė	M8	34	1	M6	35	1			
21	Duryš	M4	12	2						
22	Dėžė	M4	15	4						
23	Rėmas	M4	11	16	M5	22	3			
24	Dėžė	M6	17	14						
25	Dėžė	M4	37	2						
26	Rėmas	M6	31	2						
27	Kita	M6	38	4						
28	Kita	M5	55	4	M6	25	4			
29	Duryš	M6	27	8	M4	37	2			
30	Dėžė	M6	35	12						
31	Dėžė	M6	25	9						
32	Dėžė	M4	16	16	M5	32	6			
33	Dėžė	M5	22	2						
34	Duryš	M6	25	8						
35	Kita	M4	15	2						
36	Duryš	M3	30	4						
37	Dėžė	M5	44	4	M3	42	4			
38	Duryš	M5	15	6						
39	Dėžė	M8	21	2						
40	Rėmas	M4	14	7						
41	Dėžė	M3	45	9	M4	12	6	M5	16	4
42	Dėžė	M5	15	16						
43	Kita	M6	26	2						
44	Duryš	M6	22	8						
45	Dėžė	M6	22	8						
46	Duryš	M4	15	12						
47	Duryš	M6	20	8	M5	27	3			
48	Dėžė	M4	30	16						
49	Rėmas	M6	21	2						
50	Kita	M6	35	6						

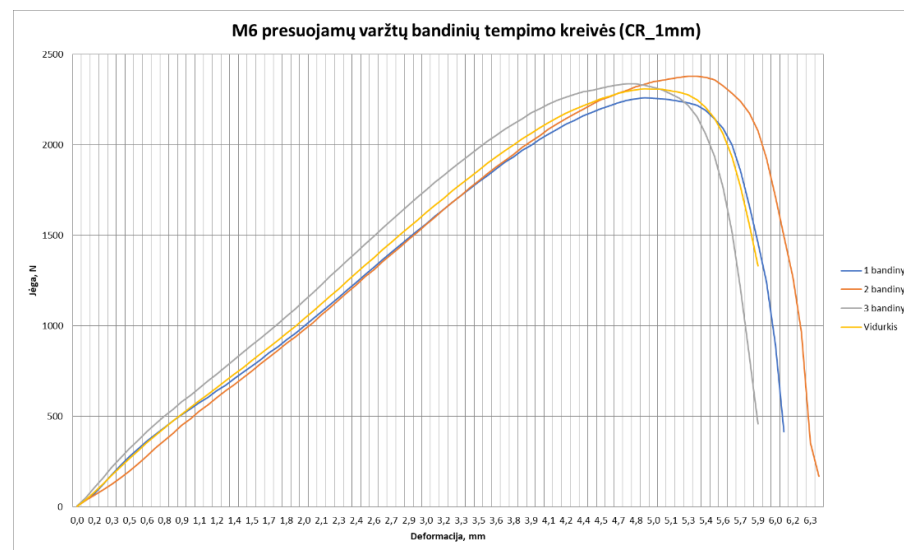
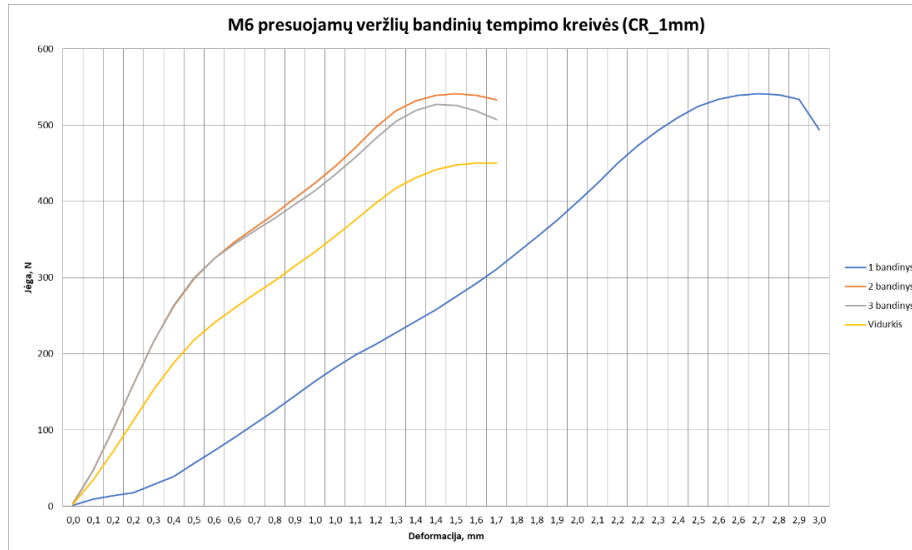
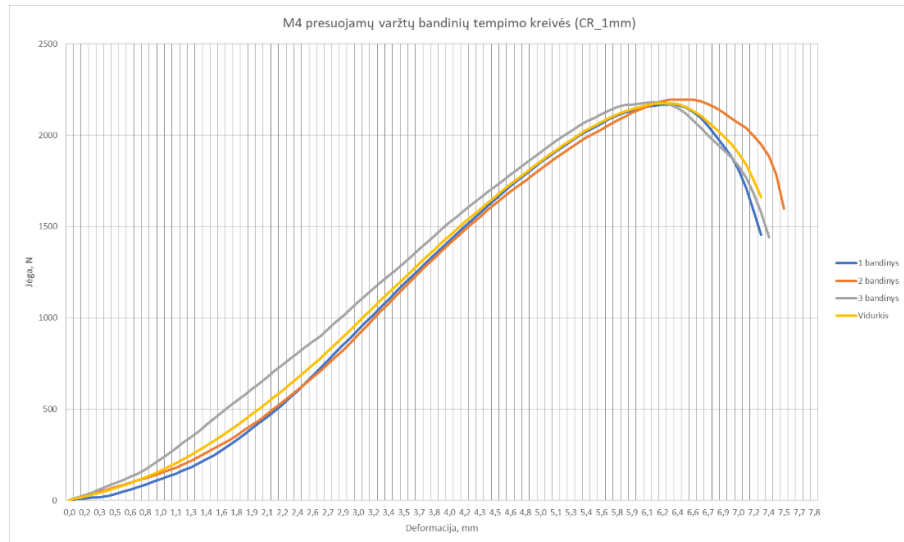
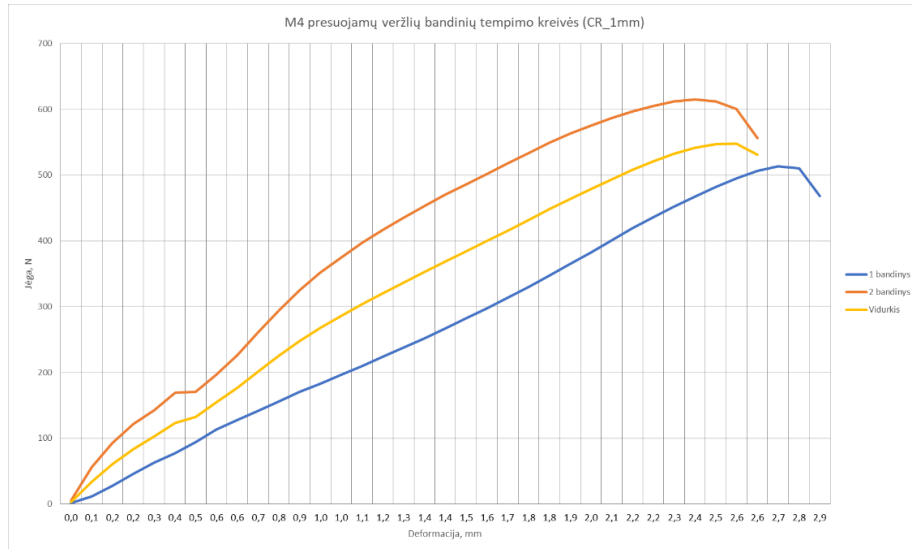
## 2 priedas. Bandinių tvirtinimo įrangos brėžinys



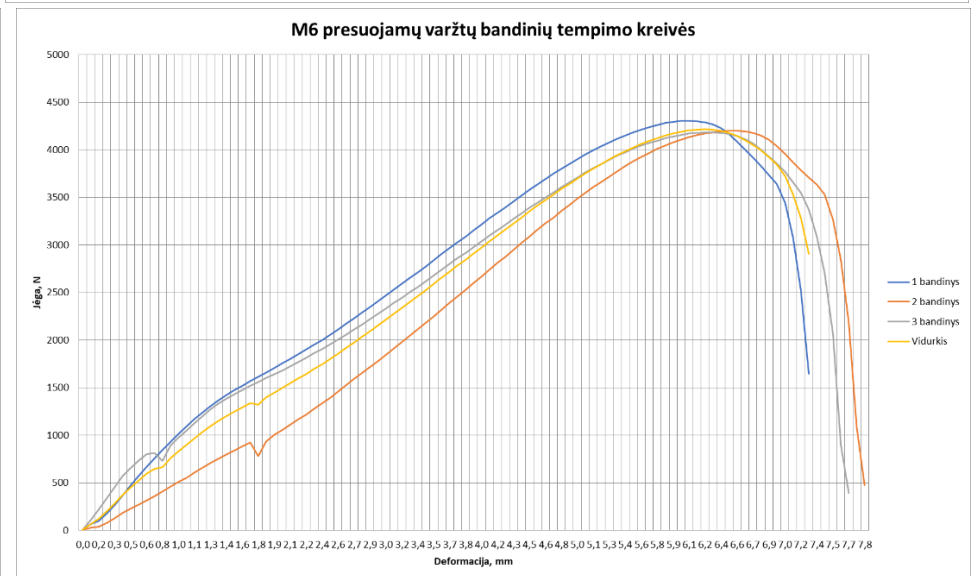
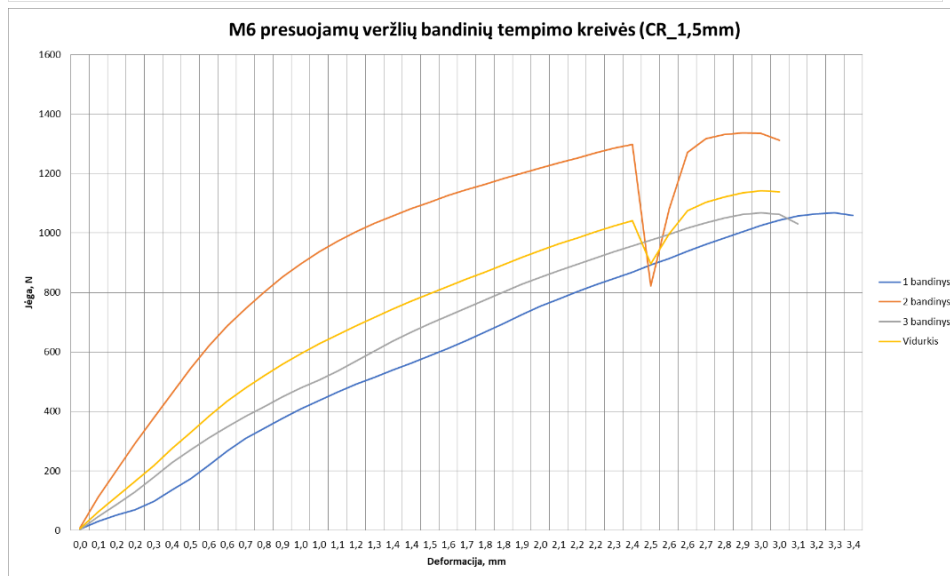
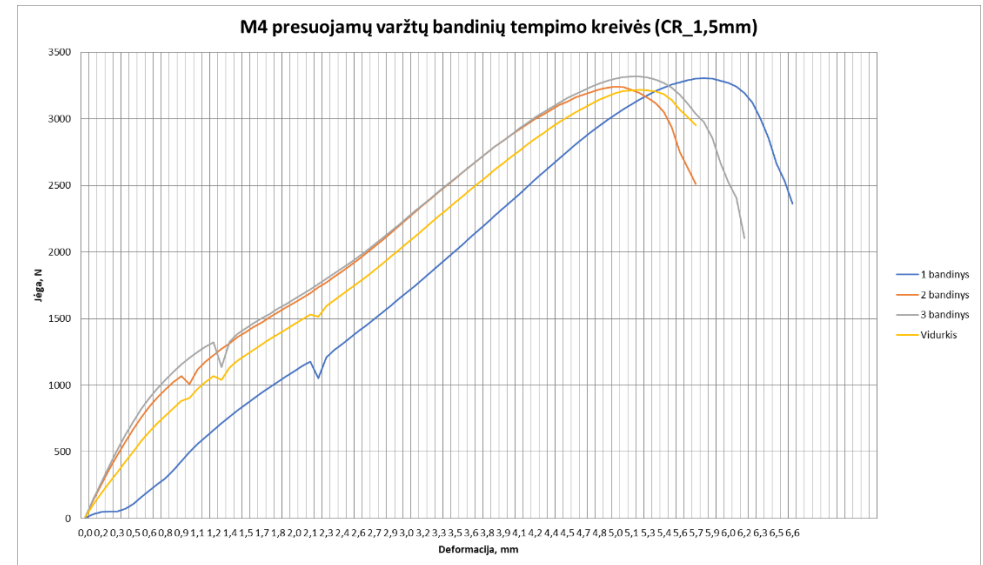
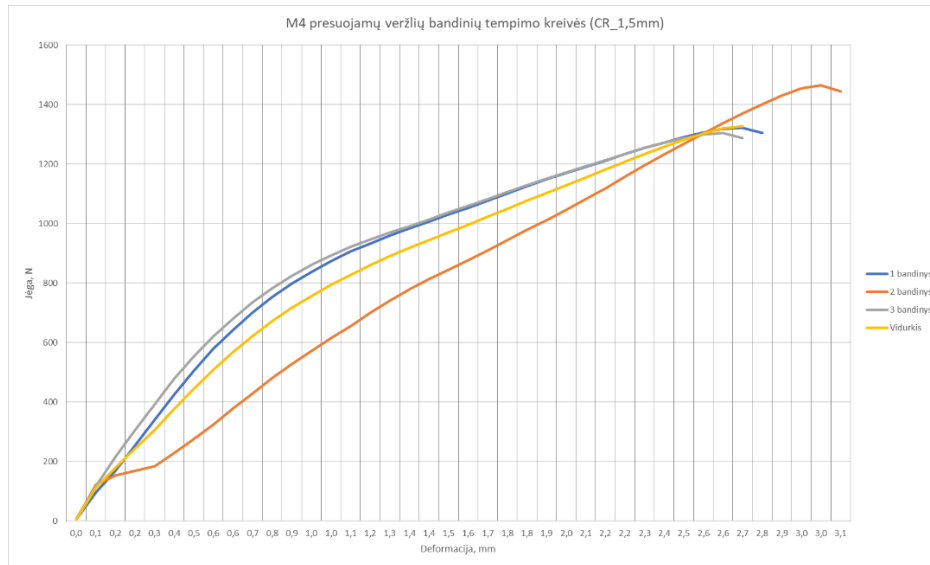
### 3 priedas. Prasukimo bandinių tvirtinimo brėžinys



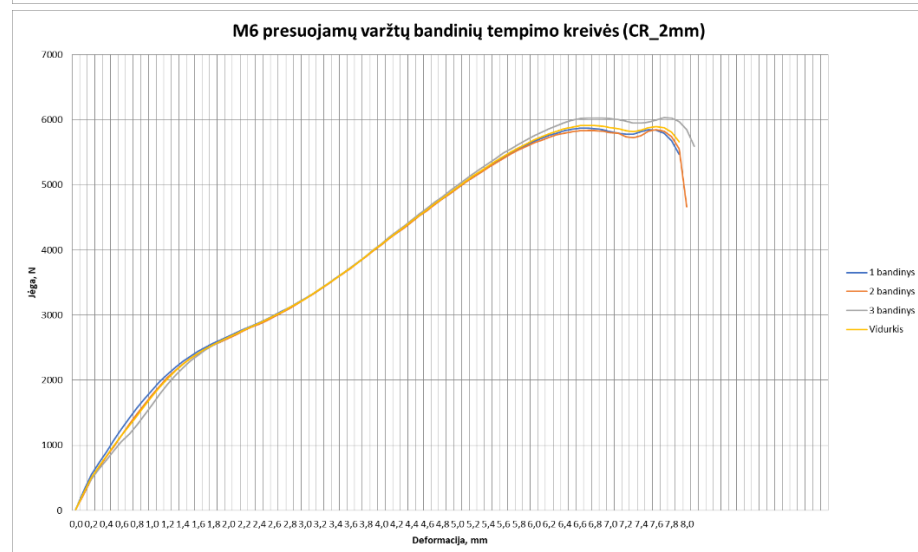
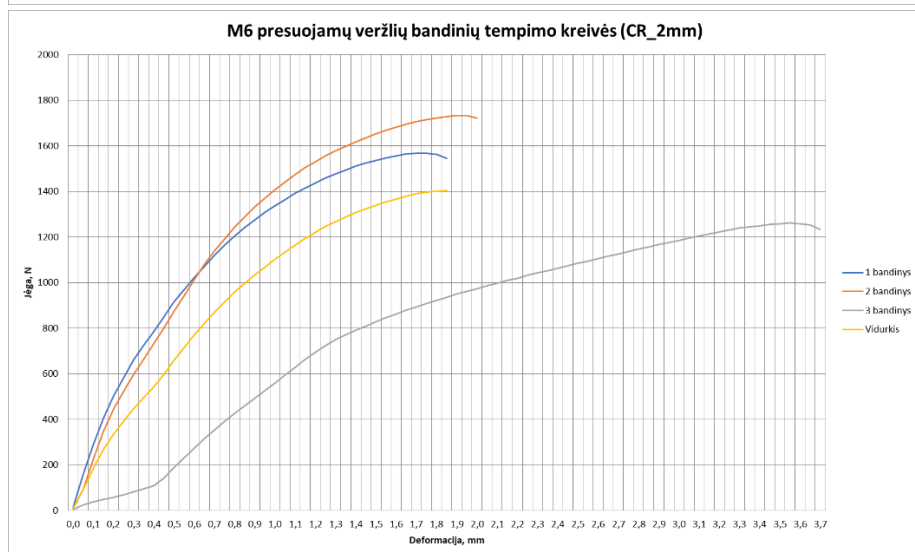
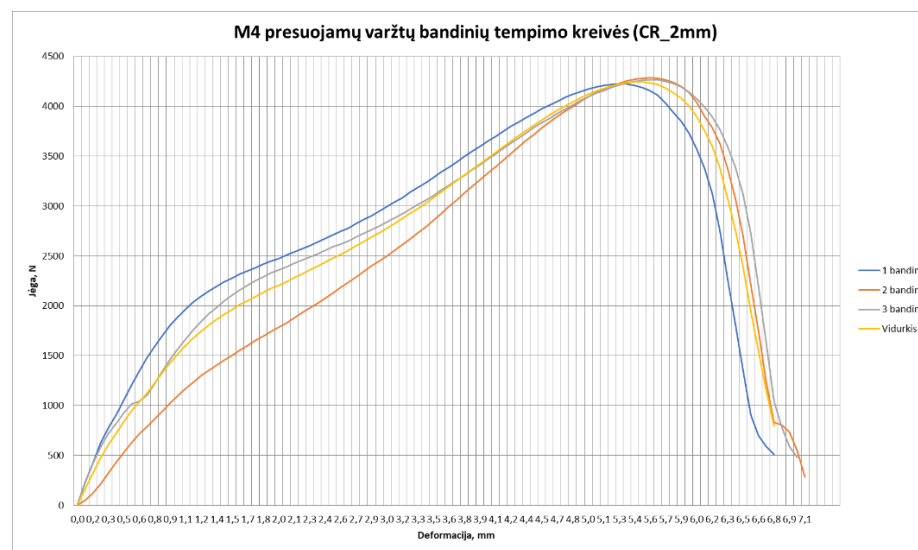
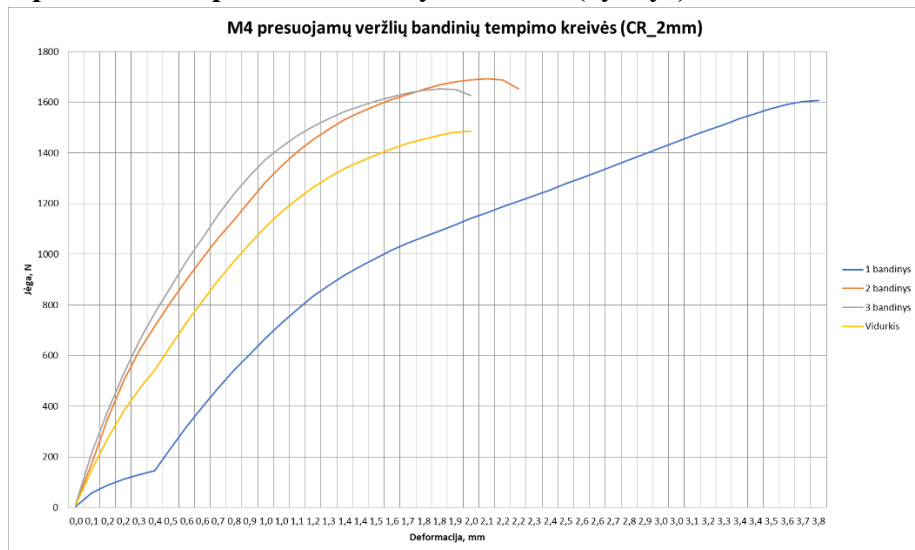
## 4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai



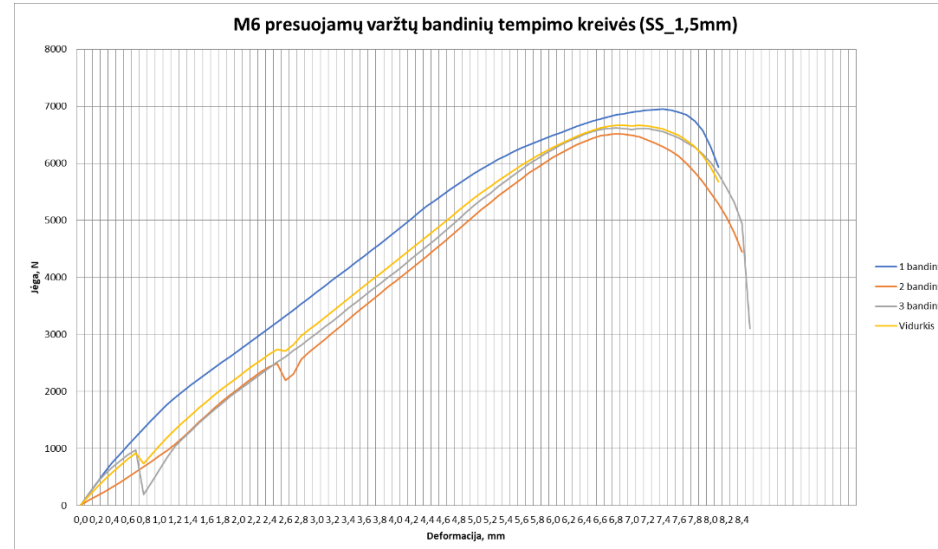
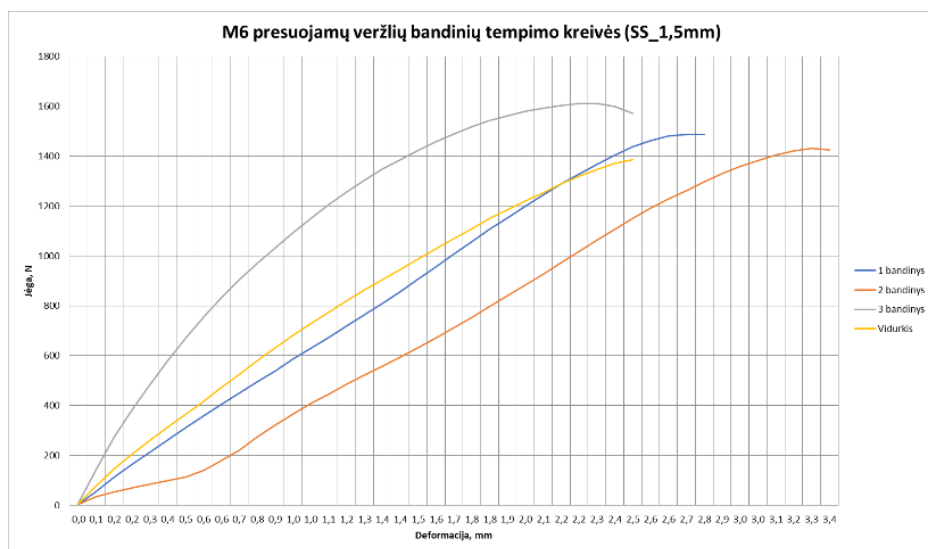
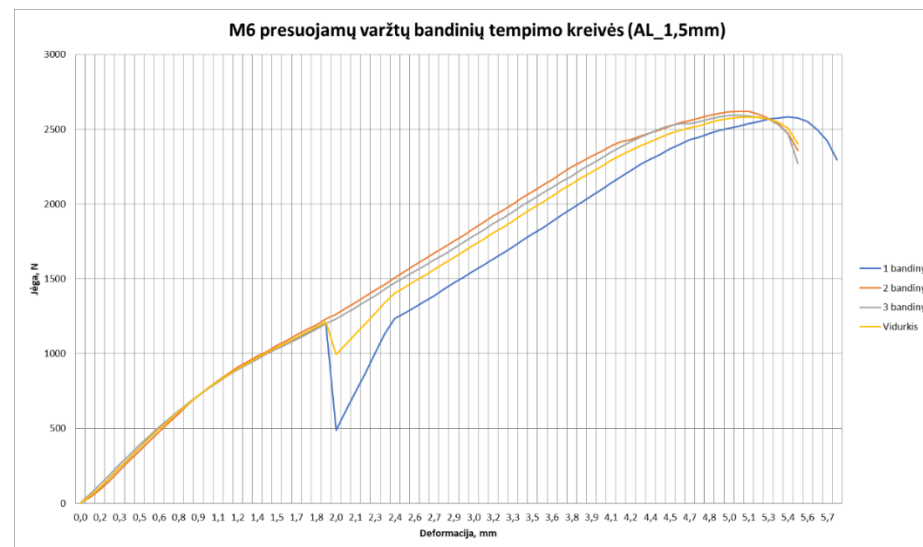
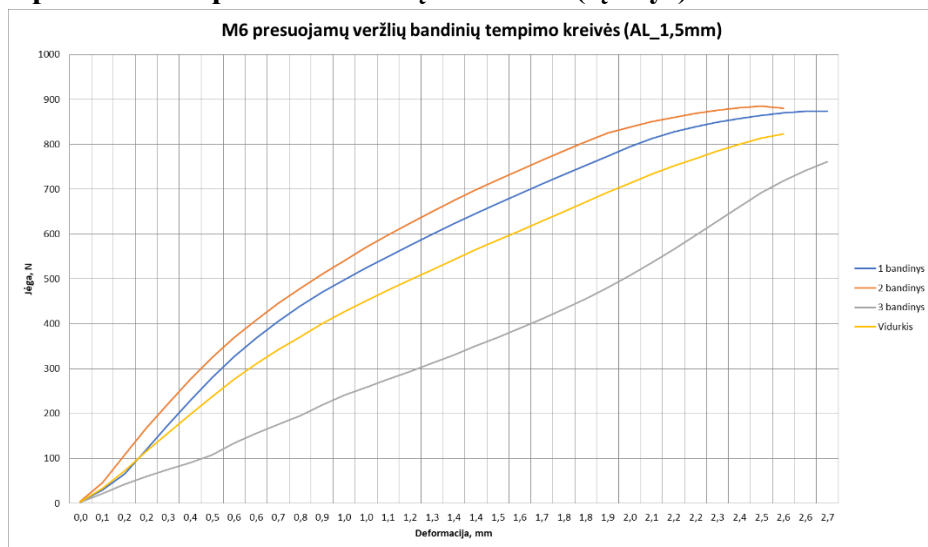
#### 4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai (tęsinys)



## 4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai (tęsinys)



#### 4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai (tęsinys)



#### 4 priedas. Tempimo matavimų rezultatai (tęsinys)

