



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

# **Srieginių sujungimų klijų apsaugos nuo atsileidimo efektyvumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Kasparas Vilkevičius**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Eidukynas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



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

# **Srieginių sujungimų klijų apsaugos nuo atsileidimo efektyvumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

**Kasparas Vilkevičius**

Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Eidukynas**

Vadovas

**Asist. dr. Joris Vėžys**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kasparas Vilkevičius

## **Srieginių sujungimų klijų apsaugos nuo atsileidimo efektyvumo tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Kasparas Vilkevičius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Kaunas technologijos universitetas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Kasparui Vilkevičiui

### 1. Projekto tema

Srieginių sujungimų klijų apsaugos nuo atsileidimo efektyvumo tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Effectiveness Analysis of Adhesive Self-Loosening Protection for Threaded Joints

*(Anglų kalba)*

### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Ištirti klijuotų srieginių sujungimų efektyvumą siekiant išlaikyti pakankamą sujungimo apsaugą nuo savaiminio atsileidimo.

Uždaviniai:

1. Atlikti srieginių sujungimų fiksavimo nuo savaiminio atsileidimo sprendimų bei atliktų tyrimų analizę;
2. Suprojektuoti išardomą dinaminių apkrovų testavimo stendą remiantis tarptautinių standartų rekomendacijomis, parinkti tyrimų bandinius ir reikalingą įrangą;
3. Sudaryti tyrimų metodologijas ir remiantis jomis atlikti eksperimentinius tyrimus varžtinių sujungimų fiksavimo klijų efektyvumui nustatyti;
4. Išanalizavus gautus tyrimų rezultatus sudaryti srieginių sujungimų fiksavimo klijų panaudojimo rekomendacijas.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Tyrimuose būtina naudoti:

- Trijų skirtingų gamintojų skirtingų stiprumų klasių klijus;
- Dviejų skirtingų padengimų tvirtinimo elementus: plieninius su juodo oksido ir plieninius su cinko danga.

Projekto autorius

Kasparas Vilkevičius

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

2024-02-19

*(Data)*

Projekto vadovas

Darius Eidukynas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Krypties studijų  
programų vadovas

Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Vilkevičius, Kasparas. Srieginių sujungimų klijų apsaugos nuo savaiminio atsileidimo efektyvumo tyrimas. Baigiamasis magistro projektas / vadovas Darius Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų kryptių grupė), studijų kryptis: Technologiniai mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: sriegis, anaerobinis, atsileidimas, fiksavimas, Loctite.

Kaunas, 2024. p.66

## Santrauka

Lietuvoje sparčiai plečiantis pramonei bei automatizuotų procesų diegimui gamybos linijose, susidaro vis didesnis poreikis naudoti specialius pramonės įrenginius. Vienas iš dažniausiai naudojamų komponentų tokiuose įrenginiuose yra srieginiai sujungimai. Tai universalios paskirties jungiamosios dalys, kurių dėka tam tikri surinkimo vienetai gali būti lengvai išardomi, aptarnaujami ir atgal surenkami. Tačiau veikiantis įrenginys gali sukelti įvairių pašalinių reakcijų, pavyzdžiui dinamines apkrovas, virpesius, temperatūros šuolius ir kt., kurios gali daryti didelę įtaką srieginių sujungimų efektyvumui ir tuo pačiu įrenginių našumui bei panaudojimui. Siekiant išlaikyti aukštą srieginių sujungimų patikimumo lygį dažnai yra naudojamos papildomos priemonės, kurios neleidžia lengvai ir savaime srieginiam sujungimui atsileisti. Viena iš tokių priemonių yra srieginių sujungimų fiksavimo klijai.

Šiame baigiamajame magistro projekte buvo aiškinamasi Lietuvos rinkoje tiekiamų srieginių sujungimų klijų pagrindinės stiprumo charakteristikos bei jų atsparumas sujungimą veikiančiam išoriniam poveikiui. Rengiant šį darbą buvo apžvelgtos tokios klijų alternatyvos, kaip pavyzdžiui veržlės su nailoniniu žiedu ar dantyta jungė, ir įvertinti jų privalumai bei trūkumai. Analizuojant atliktus tyrimus su srieginių sujungimų fiksavimų klijais buvo rasta įdomių bei naudingų tyrėjų įžvalgų apie klijų poveikį trinties koeficientui tarp sriegių paviršių, apie klijų atsparumą aukštam drėgmės ir temperatūros lygiui. Vis dėlto, buvo pasigesta naudojamų klijų įvairovės bei jų palyginimo tyrimuose, taip pat nebuvo vertinami skirtingi srieginių detalių padengimų tipai ir jų įtaka klijų savybėms, todėl buvo nuspręsta atlikti tris tyrimus su trijų gamintojų klijais bei skirtingų srieginių detalių padengimu: patikrinamąjį irimo sukimo momento nustatymo tyrimą, maksimalios darbinės temperatūros poveikį irimo sukimo momentui bei klijų atsparumo tyrimą dinaminėms smūginėms apkrovoms.

Tiek patikrinamojo, tiek ir temperatūros poveikio tyrimai buvo vykdomi naudojant M10 dydžio varžtus. Atlikus tyrimus gauti rezultatai parodė, kad „A prekinio ženklo“ ir „B prekinio ženklo“ prekinų ženklų klijai parodė patikimiausias savybes, siekiant išlaikyti srieginio sujungimo efektyvumą. Vienintelis didžiausias skirtumas tarp šių prekių ženklų yra kaina, kuri skiriasi net 93%. Atsparumo dinaminėms apkrovoms tyrimas buvo vykdomas remiantis NASM 1312-7 standartu. Pagal šį standartą srieginių sujungimų efektyvumas yra vertinamas juos veikiant smūginėmis apkrovomis specialiame bandymo stende ant virpesių stendo. Gauti rezultatai parodė, kad didžiausią atsparumą apkrovoms turi klijai „A prekinio ženklo“, o „B prekinio ženklo“ – šiek tiek mažesni, bet taip pat pakankami. Vykdytuose tyrimuose naudoti trečio prekinio ženklo – „C prekinio ženklo“ klijai daugumoje atveju parodė mažai patenkinamus rezultatus ir šių klijų nėra rekomenduojama naudoti jokių atveju.

Vilkevičius, Kasparas. Effectiveness Analysis of Adhesive Self-Loosening Protection for Threaded Joints. Master's Final Project / supervisor Darius Eidukynas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Technological Sciences, Mechanical Engineering.

Key words: thread, anaerobic, loosening, fixation, Loctite.

Kaunas, 2024. p.66

### **Summary**

With the rapid expansion of industry and the introduction of automated processes in production lines in Lithuania, there is an increasing need to use special industrial devices. One of the most commonly used components in such devices is threaded connections. These are general purpose connectors that allow certain assembly units to be easily disassembled, serviced and reassembled. However, the operating device can cause various external reactions, such as dynamic loads, vibrations, temperature spikes, etc., which can significantly affect the efficiency of the threaded connections and, at the same time, the performance and utilization of the devices. In order to maintain a high level of reliability of threaded connections, additional measures are often used that prevent the threaded connection from loosening easily and spontaneously. One such tool is the adhesive for fixing threaded connections.

In this final master's project, the main strength characteristics of the adhesives for threaded joints supplied to Lithuanian market and their resistance to external influences affecting the joint were explained. During the preparation of this paper, alternatives to such adhesives as, for example, nuts with a nylon ring or toothed flange were reviewed and their advantages and disadvantages were evaluated. Analyzing the research conducted with adhesives for fixing threaded connections, researchers found interesting and useful insights about the effect of adhesives on the coefficient of friction between threaded surfaces, about the resistance of adhesives to high levels of humidity and temperature. However, there was found a lack of research on the variety of adhesives used and their comparison, and the different types of threading coatings and their influence on the adhesive properties were not evaluated, so it was decided to conduct three studies with adhesives from three manufacturers and different threading coatings: a verification study to determine the breakaway torque, the effect of the maximum operating temperature on the breakaway torque and the investigation of the adhesive resistance to dynamic shock loads.

Both verification and maximum temperature tests were carried out using M10 size bolts. The results of the tests showed that "A brand" and "B brand" brand adhesives showed the most reliable properties to maintain threading performance. The single biggest difference between these brands is the price, which differs by as much as 93%. The test of resistance to dynamic loads was carried out based on the NASM 1312-7 standard. According to this standard, the effectiveness of threaded connections is evaluated by subjecting them to shock loads in a special test bench on a vibration bench. The obtained results showed that "A brand" glue has the highest load resistance, and "B brand" has a slightly lower, but also sufficient, load resistance. In the conducted studies, the use of third-party adhesives - "C brand" - showed unsatisfactory results in most cases, and this adhesive is not recommended for use in any case.

## Turinys

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Lentelių sąrašas .....</b>                                                                                       | <b>8</b>  |
| <b>Paveikslų sąrašas .....</b>                                                                                      | <b>9</b>  |
| <b>Įvadas.....</b>                                                                                                  | <b>11</b> |
| <b>1. Sprendimų nuo srieginių sujungimų savaiminio atsileidimo analizė .....</b>                                    | <b>12</b> |
| 1.1. Varžtinių sujungimų atsileidimo priežastys .....                                                               | 12        |
| 1.1.1. Ne rotacinio pobūdžio sujungimų atsileidimų priežastys.....                                                  | 12        |
| 1.1.2. Rotacinio pobūdžio sujungimų atsileidimų priežastys .....                                                    | 12        |
| 1.2. Mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo .....                             | 14        |
| 1.3. Cheminės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo.....                                | 17        |
| 1.3.1. Srieginių sujungimų klijų cheminis veikimas .....                                                            | 18        |
| 1.3.2. Srieginių sujungimų klijų veikimas su įvairiomis medžiagomis.....                                            | 19        |
| 1.4. Srieginių sujungimų dinaminio apkrovų bandymų metodologijos .....                                              | 20        |
| 1.4.1. DIN 65151 standartas .....                                                                                   | 20        |
| 1.4.2. ISO 16130:2015 standartas.....                                                                               | 21        |
| 1.4.3. NASM 1312-7 standartas .....                                                                                 | 21        |
| 1.5. Atliktų tyrimų su cheminėmis apsaugos priemonėmis nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo analizė ..... | 22        |
| 1.5.1. Anaerobinių klijų įtakos trinties koeficientui tarp sriegių paviršių vertinimas .....                        | 23        |
| 1.5.2. Skirtingų montavimo procedūrų įtaka trinties koeficientui naudojant anaerobinius klijus...                   | 23        |
| 1.5.3. Temperatūros ir drėgmės poveikis anaerobinių klijų irimo sukimo momentui .....                               | 25        |
| 1.5.4. Aukštai temperatūrai pritaikytų anaerobinių klijų tobulinimas.....                                           | 26        |
| 1.5.5. Anaerobinių klijų savybių palyginimas su „Heli-Coil“ įdėklais .....                                          | 27        |
| 1.6. Skyriaus apibendrinimas .....                                                                                  | 28        |
| <b>2. Tyrimų metodologijų sudarymas.....</b>                                                                        | <b>30</b> |
| 2.1. Tyrimų bandinių ir naudojamos įrangos parinkimas.....                                                          | 30        |
| 2.1.1. Anaerobinių klijų parinkimas .....                                                                           | 30        |
| 2.1.2. Tvirtinimo detalių parinkimas tyrimui .....                                                                  | 30        |
| 2.1.3. Dinaminio apkrovų bandymo stendas .....                                                                      | 31        |
| 2.1.4. Naudojama bandymų įranga.....                                                                                | 32        |
| 2.2. Tyrimų vykdymo sekos ir nurodymai .....                                                                        | 33        |
| 2.2.1. Irimo sukimo momento patikrinimo bandymo vykdymo seka.....                                                   | 33        |
| 2.2.2. Terminio poveikio bandymo vykdymo seka .....                                                                 | 35        |
| 2.2.3. Dinaminio smūginių apkrovų bandymo vykdymo seka .....                                                        | 36        |
| <b>3. Tyrimų rezultatų analizė .....</b>                                                                            | <b>39</b> |
| 3.1. Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo rezultatai .....                                                       | 39        |
| 3.2. Terminio poveikio tyrimo rezultatai.....                                                                       | 43        |
| 3.3. Dinaminio smūginių apkrovų tyrimo rezultatai .....                                                             | 48        |
| 3.4. Tyrimų rezultatų aptarimas, diskusija .....                                                                    | 53        |
| <b>Išvados ir rekomendacijos .....</b>                                                                              | <b>55</b> |
| <b>Informacijos ir literatūros šaltinių sąrašas .....</b>                                                           | <b>56</b> |
| <b>Priedai.....</b>                                                                                                 | <b>59</b> |

## **Lentelių sąrašas**

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1.1 lentelė.</b> Įvairių medžiagų veikimas su anaerobiniais klizais [17] .....                                                                | 19 |
| <b>1.2 lentelė.</b> Skirtumai tarp DIN 65151 ir ISO 16130:2015 standartų [23].....                                                               | 21 |
| <b>1.3 lentelė.</b> Ilgalaikės temperatūros ir drėgmės poveikio tyrimo sąlygos [25] .....                                                        | 25 |
| <b>2.1 lentelė.</b> Vidutinės fiksacijos klizų palyginimas .....                                                                                 | 30 |
| <b>2.2 lentelė.</b> Stiprios fiksacijos klizų palyginimas .....                                                                                  | 30 |
| <b>2.3 lentelė.</b> Testavimo stendo detalių matmenys .....                                                                                      | 31 |
| <b>3.1 lentelė.</b> Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais .....           | 39 |
| <b>3.2 lentelė.</b> Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais .....            | 40 |
| <b>3.3 lentelė.</b> Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais .....           | 41 |
| <b>3.4 lentelė.</b> Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais.....             | 42 |
| <b>3.5 lentelė.</b> Terminio poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais .....                   | 44 |
| <b>3.6 lentelė.</b> Terminio poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais .....                    | 45 |
| <b>3.7 lentelė.</b> Terminio poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais.....                    | 46 |
| <b>3.8 lentelė.</b> Terminio poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais .....                    | 47 |
| <b>3.9 lentelė.</b> Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais ..... | 49 |
| <b>3.10 lentelė.</b> Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais.....  | 50 |
| <b>3.11 lentelė.</b> Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klizais..... | 51 |
| <b>3.12 lentelė.</b> Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klizais.....  | 52 |

## Paveikslų sąrašas

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1.1 pav.</b> Rotacinį srieginio sujungimo atsileidimą iššaukiančios dinaminės apkrovos [8].....                                                                                                                       | 13 |
| <b>1.2 pav.</b> Srieginio sujungimo atsileidimo paaiškinimas [9] .....                                                                                                                                                   | 13 |
| <b>1.3 pav.</b> Mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo [15] ...                                                                                                                    | 17 |
| <b>1.4 pav.</b> Anaerobinių klijų veikimo seka [17].....                                                                                                                                                                 | 19 |
| <b>1.5 pav.</b> Junkerio testo mašina ir jos konstrukcija [19].....                                                                                                                                                      | 20 |
| <b>1.6 pav.</b> NASM 1312-7 standarto bandymo stendas [21] .....                                                                                                                                                         | 22 |
| <b>1.7 pav.</b> Trinties koeficiento pokytis naudojant fiksavimo klijus: a) Trinties koeficiento pokytis vertinant pagal naudojamą medžiagą, b) Trinties koeficiento pokytis vertinant pagal sukibimo santykį [24] ..... | 23 |
| <b>1.8 pav.</b> Montavimo procedūrų įtaka trinties koeficiento tarp sriegio paviršių dydžiui: a) Laiko tarpo tarp pirminio ir galutinio užveržimo, b) Pirminio užveržimo greičio [27].....                               | 24 |
| <b>1.9 pav.</b> Fiksavimo klijų rūšies įtaka trinties koeficientui [27].....                                                                                                                                             | 25 |
| <b>1.10 pav.</b> Ilgalaikės temperatūros ir drėgmės poveikio tyrimo rezultatai: a) su „Loctite 243“, b) su „Loctite 270“ [25].....                                                                                       | 26 |
| <b>1.11 pav.</b> Anaerobinių klijų tobulinimo aukštomis temperatūroms tyrimo rezultatai [26].....                                                                                                                        | 27 |
| <b>1.12 pav.</b> Tyrimo su „Heli-Coil“ įdėklais rezultatai: a) su „Heli-Coil“ fiksuojančiu įdėklu; b) su „Loctite 242“ anaerobiniais klijais [28].....                                                                   | 28 |
| <b>2.1 pav.</b> Dinaminių apkrovų bandymo stendo komponentų matmenys [21] .....                                                                                                                                          | 31 |
| <b>2.2 pav.</b> Dinaminių apkrovų bandymo stendas: a) neišardomas stendas; b) išardomas stendas.....                                                                                                                     | 32 |
| <b>2.3 pav.</b> Sukimo momento testavimo mašina „Gunt WP 510“ .....                                                                                                                                                      | 32 |
| <b>2.4 pav.</b> M10 varžtų padengimas klijais .....                                                                                                                                                                      | 33 |
| <b>2.5 pav.</b> Suklijuoti bandiniai .....                                                                                                                                                                               | 34 |
| <b>2.6 pav.</b> Irimo sukimo momento tyrimo bandinys įtvirtintas sukimo momento testavimo mašinoje.....                                                                                                                  | 34 |
| <b>2.7 pav.</b> Bandinių kaitinimas terminėje kameroje.....                                                                                                                                                              | 35 |
| <b>2.8 pav.</b> M8 varžtų padengimas klijais.....                                                                                                                                                                        | 36 |
| <b>2.9 pav.</b> Smūginių apkrovų bandymo surinktas bandinys .....                                                                                                                                                        | 37 |
| <b>2.10 pav.</b> Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo įranga .....                                                                                                                                                          | 37 |
| <b>2.11 pav.</b> Smūginių apkrovų tyrimo bandinys įtvirtintas sukimo momento testavimo mašinoje .....                                                                                                                    | 38 |
| <b>3.1 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant vidutinės fiksacijos klijus su juodai oksiduotomis detalėmis.....                                                                    | 39 |
| <b>3.2 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant stiprios fiksacijos klijus su juodai oksiduotomis detalėmis.....                                                                     | 40 |
| <b>3.3 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant vidutinės fiksacijos klijus su karštai cinkuotomis detalėmis.....                                                                    | 41 |
| <b>3.4 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant stiprios fiksacijos klijus su karštai cinkuotomis detalėmis .....                                                                    | 42 |
| <b>3.5 pav.</b> Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo bandiniai po išardymo .....                                                                                                                                      | 43 |
| <b>3.6 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant vidutinės fiksacijos klijus su juodai oksiduotomis detalėmis.....                                                                     | 44 |
| <b>3.7 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant stiprios fiksacijos klijus su juodai oksiduotomis detalėmis.....                                                                      | 45 |
| <b>3.8 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant vidutinės fiksacijos klijus su karštais cinkuotomis detalėmis .....                                                                   | 46 |

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3.9 pav.</b> Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant stiprios fiksacijos kljus su karštais cinkuotomis detalėmis .....         | 47 |
| <b>3.10 pav.</b> Terminio poveikio tyrimo bandiniai po išardymo.....                                                                                         | 48 |
| <b>3.11 pav.</b> Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant vidutinės fiksacijos kljus su juodai oksiduotomis detalėmis.....  | 48 |
| <b>3.12 pav.</b> Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant stiprios fiksacijos kljus su juodai oksiduotomis detalėmis.....   | 49 |
| <b>3.13 pav.</b> Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant vidutinės fiksacijos kljus su karštais cinkuotomis detalėmis..... | 50 |
| <b>3.14 pav.</b> Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant stiprios fiksacijos kljus su karštais cinkuotomis detalėmis.....  | 51 |
| <b>3.15 pav.</b> Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo juodai oksiduoti bandiniai po išardymo .....                                                              | 52 |
| <b>3.16 pav.</b> Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo karštais cinkuoti bandiniai po išardymo.....                                                              | 53 |

## Įvadas

Daugelyje mus supančių mechaninių, buitinių, transporto ar kitų įrenginių gamyboje dažnai yra naudojami srieginiai sujungimai. Dėl greito ir paprasto montavimo, didelės įvairovės priemonių bei lengvo išardymo srieginė jungtis yra dažniausiai pasirenkamas detalių sujungimo būdas, kai nėra taikomi tam tikri specialūs reikalavimai. Įprastai pagal tvirtinimo būdą srieginės jungtys gali būti skirstomos į trys tipus:

- varžtinė jungtis, kai detalių surinkimui yra naudojamas varžtas ir veržlė su papildomais komponentais pagal reikalavimą;
- sraigtinė jungtis, kai vienoj iš jungiamųjų detalių yra pagamintas sriegis todėl sujungimui reikalinga naudoti tik varžtą;
- smeiginė jungtis, kuomet detalių sujungimui vietoj varžto yra naudojama sriegta smeigė ir ji suveržiama naudojant veržles;

Tačiau nepaisant labai didelio srieginių sujungimo naudojimo pramonėje, ši priemonė turi ir tam tikrų trūkumų, iš kurių vienas pagrindinių yra savaiminis srieginės jungties atsileidimas. Šis reiškinys gali įvykti dėl įvairių aplinkos veiksnių (jungtyje naudojamos medžiagos, jų fizikinės savybės, jungtį veikianti temperatūra, drėgmė, išorinės apkrovos ir kt.), kurių padariniai vienu atveju gali būti nežymūs, kiti sukeltys didelius finansinius nuostolius arba net katastrofiški. Istorija rodo, jog tokių įvykių yra buvę ne vienas:

- traukinio nuvažiavimas nuo bėgių Grayrigg mieste, Jungtinėje karalystėje – 2007 metų vasario 23d. įvykis, kurio metu žuvo vienas traukinio keleivis ir sužeisti kiti 90 keleivių. Pagrindinė šios avarijos priežastis buvo įvardinta atsileidusios jungtys ant bėgių sankirtos. Dėl nuolatinių virpesių atsileido praplėtimo sijų varžtinės jungtys dėl ko nebesutapto bėgių vėžios plotis su traukinio ratų pločiu ir dėl to traukinys nuvažiavo nuo bėgių [1].
- lėktuvo gaisras Nahos oro uoste, Japonijoje – 2007 metų rugpjūčio 20d. įvykis, kurio metu buvo sužeisti 4 žmonės. Po tyrimo buvo išsiaiškinta, kad skrydžio metu nuo dešiniojo sparno priešsparnio atsileidęs iš iškritęs varžtas padarė 2-3 cm diametro skylę sparno kuro bake ir lėktuvui nusileidus į oro uostą kuro nuotėkis užsiliepsnojo nuo orlaivio variklio [2].
- atrakcionų parko avarija Šendžene, Kinijoje – 2010 metų birželio 29d. įvykis, per kurį žuvo 6 žmonės. Važiuojant traukinukui „linksmiesiems kalneliams“ atsileido vieno iš vežimėlių rato laikantysis varžtas ir dėl to visas traukinukas nuvažiavo nuo bėgių [3].
- Porsche 911 GT3 automobilio atšaukimas 2014 metais dėl atsileidžiančių švaistiklių varžtų, kurie sukeldavo tepalo nuotėkius ir varikliai užsidegdavo važiuojant [4].

Šio baigiamojo projekto **tikslas** - ištirti klijuotų srieginių sujungimų efektyvumą siekiant išlaikyti pakankamą sujungimo apsaugą nuo savaiminio atsileidimo. Šiam tikslui pasiekti iškelti keturi **uždaviniai**:

1. Atlikti srieginių sujungimų fiksavimo nuo savaiminio atsileidimo sprendimų bei atliktų tyrimų analizę;
2. Suprojektuoti išardomą dinaminių apkrovų testavimo stendą remiantis tarptautinių standartų rekomendacijomis, parinkti tyrimų bandinius ir reikalingą įrangą;
3. Sudaryti tyrimų metodologijas ir remiantis jomis atlikti eksperimentinius tyrimus varžtinių sujungimų fiksavimo klijų efektyvumui nustatyti;
4. Išanalizavus gautus tyrimų rezultatus sudaryti srieginių sujungimų fiksavimo klijų panaudojimo rekomendacijas.

## **1. Sprendimų nuo srieginių sujungimų savaiminio atsileidimo analizė**

### **1.1. Varžtinių sujungimų atsileidimo priežastys**

Remiantis praktika [5] srieginės jungtys dažniausiai savaime atsileisti gali dėl trijų priežasčių:

1. Jungties pradinė įvarža buvo per maža;
2. Jungtys patyrė dideles valkšnumo deformacijas;
3. Jungtį veikė kintamosios ir smūginės apkrovos;

Tačiau šias priežastis lygiai taip pat galima išskaidyti ir pagal du pobūdžius, t.y. kaip srieginis sujungimas atsileidžia – ne rotacinis ir rotacinis pobūdžiai [6].

#### **1.1.1. Ne rotacinio pobūdžio sujungimų atsileidimų priežastys**

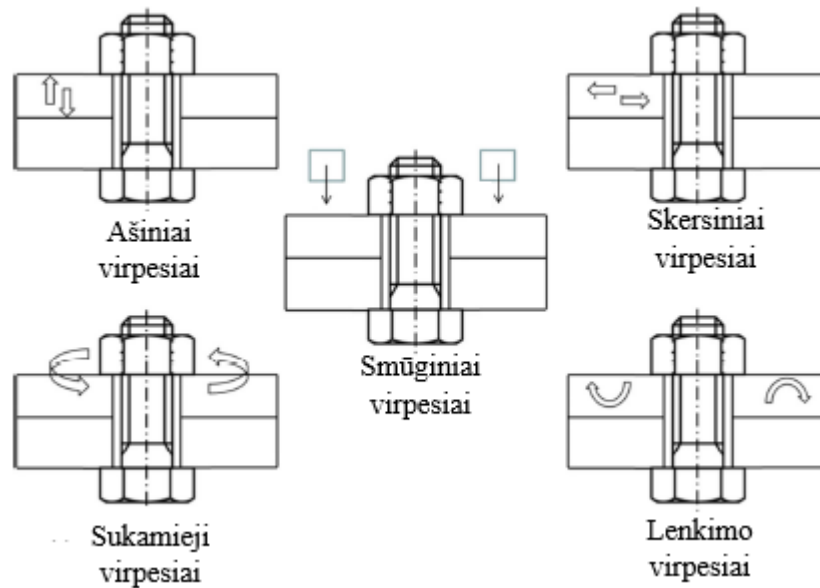
Ne rotacinis srieginio sujungimo atsileidimas yra toks, kurio metu pradinė sujungimo įvarža yra sumažinama arba prarandama nesisukant jokiai srieginio sujungimo daliai. Yra išskiriamos 5 pagrindinės ne rotacinio pobūdžio srieginių sujungimų atsileidimų priežastys [7]:

- valkšnumas (angl. *Creep*) – kaip ir anksčiau minėta, viena iš dažniausiai pasitaikančių ne rotacinio atsileidimo priežasčių. Laikui bėgant dėl lėtinės plastinės deformacijos deformuojasi veržiami kūnai ir prarandama pradinė sujungimo įvarža;
- susėdimas (angl. *Embedding*) – plastinių deformacijų susidarymas po veržlių ar varžtų besiglaudžiančiais paviršiais dėl didelio paviršių šiurkštumo;
- įtempių atsileidimas (angl. *Stress Relaxation*)- pradinio užveržimo metu sukelti įtempiai laikui bėgant sumažėja ir nebegali išlaikyti reikiamo užveržimo momento;
- skirtingas terminis išsiplėtimas (angl. *Differential Thermal Expansion*) – dėl galimų temperatūrų pokyčių užveržimo ir eksploatavimo metu ir dėl skirtingų naudojamų medžiagų galimas skirtingas sujungimo detalių terminis išsiplėtimas ir dėl to yra galimas tinkamos pradinės įvaržos praradimas.
- sujungimo įtempių padidėjimas virš takumo ribos (angl. *Yielding*) – veikiant didelėms apkrovoms ar aukštai temperatūrai sujungimo detalių įtempiai gali išaugti virš takumo ribos, kas reikštų negrįžtamus pokyčius ir tuo pačiu prarastą pradinę įvaržą.

#### **1.1.2. Rotacinio pobūdžio sujungimų atsileidimų priežastys**

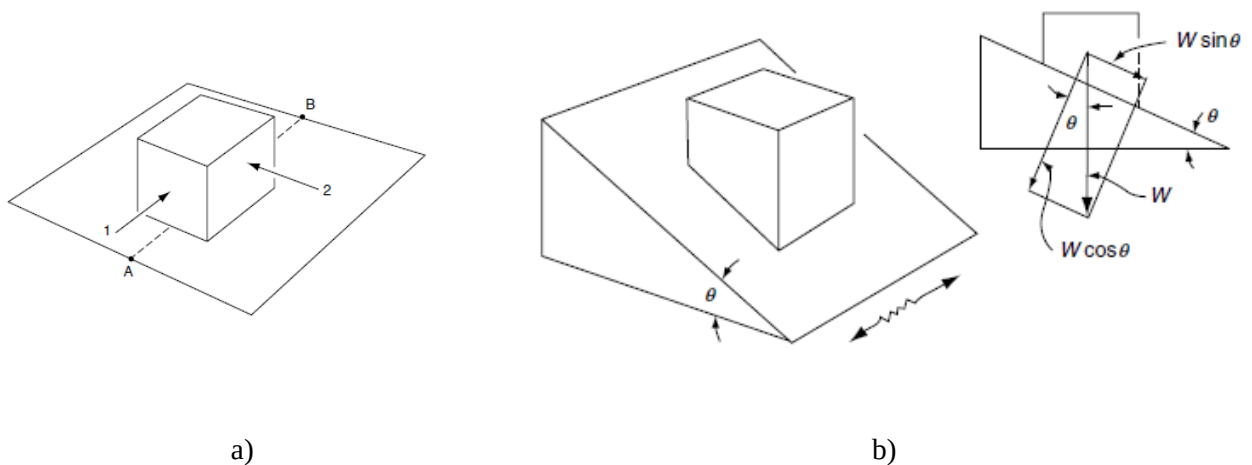
Rotacinis srieginio sujungimo atsileidimas, priešingai nei ne rotacinis, įvyksta jau dėl srieginių detalių pasisukimo, o šiam pasisukimui įtaką daryti gali įvairios priežastys, bet pagrindinė yra išoriniai virpesiai. Išskiriamos 5 grupės virpesių (žr. 1.1 pav.), kurios gali daryti įtaką srieginio sujungimo savaiminiam atsileidimui [8]:

- ašiniai (angl. *Axial*) – lygiagretūs srieginiam sujungimui;
- skersiniai (angl. *Transversal*) – statmeni srieginiam sujungimui;
- sukamieji (angl. *Torsional*) – veikiantys sujungimą lygiagrečiai ir sukamąją kryptimi;
- lenkimo (angl. *Bending*) – veikiantys sujungimą statmenai ir sukamąją kryptimi ;
- smūginiai (angl. *Impact*) – trumpos ir didelio greičio apkrovos.



**1.1 pav.** Rotacinį srieginio sujungimo atsileidimą iššaukiančios dinaminės apkrovos [8]

Srieginio sujungimo patikimumas priklauso nuo užveržimo metu susidarančios trinties jėgos tarp vidinio ir išorinių sriegių ir yra priimta, kad srieginis sujungimas savaime atsileidžia tik tuomet, kai sujungimą veikiančios anti-frikinės arba sukimo momento jėgos tampa didesnės nei pačio sujungimo sriegių trinties jėga. Šį procesą paprasčiau galima paaiškinti toliau pateikta iliustracija:



**1.2 pav.** Srieginio sujungimo atsileidimo paaiškinimas [9]

čia  $W$  – kūno svoris,  $\theta$  – kūno posvyrio kampas.

Bet kokį kūną pajudinti reikia naudoti tam tikrą jėgą. Pavyzdžiui, 1.2 pav. a) iliustracijoje norint kūną pajudinti iš taško A į tašką B ant plokščios platformos, reikia naudoti tiek jėgos, jog kūnui būtų suteiktas pradinis judėjimo momentas ir taip pat įveikta trinties jėga tarp kūno ir paviršiaus. Taip kūnas būtų pajudintas naudojant tik vieną jėgą, pažymėtą Nr. 1. Tačiau, jeigu naudotume antrą jėgą, pažymėtą Nr.2, tik kūno ir paviršiaus trinties jėgos įveikimui tuomet mums reikėtų žymiai mažesnės pirmosios jėgos, kadangi ji būtų reikalinga tik pradinio judėjimo momento suteikimui [9].

Kalbant apie srieginius sujungimus, turėtume naudoti nuožulnią plokštumą, kaip parodyta 1.2 b) paveiksle, kadangi vidinio ir išorinio sriegių paviršiai kontaktuoja tam tikru kampu  $\theta$ , lyginant su

horizontu (dažnu atveju šis kampas yra lygus  $60^\circ$ , kai kuriuose coliniuose sriegiuose šis kampas gali kisti nuo  $55$  iki  $60^\circ$ ). Šiuo atveju, pirmoji jėga, kuri nori pajudinti kūną yra lygi  $W \sin \theta$ , o trinties jėga, kuri laiko kūną vietoje yra lygi kūno svorio, šiuo atveju  $W \cos \theta$ , ir trinties koeficiento tarp paviršių sandaugai. Srieginiuose sujungimuose trinties koeficientą tarp sriegio paviršių galima apskaičiuoti naudojant Motosh formulę [11]:

$$M_A = F_V \left( 0,159 * P + 0,578 * d_2 * \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} * \mu_K \right), \quad (1)$$

čia  $M_A$  – užveržimo momentas, Nm;  $F_V$  – veržlę arba varžtą veikianti pradinė įvarža, N;  $P$  – sriegio žingsnis, m;  $d_2$  – sriegio žingsnio skersmuo, m;  $\mu_G$  – trinties koeficientas tarp sriegių;  $D_{Km}$  – kontaktuojančio varžto galvos paviršiaus skersmuo, m;  $\mu_K$  – trinties koeficientas po varžto galva.

Iš jos gauname, kad trinties koeficientas tarp sriegių yra lygus:

$$\mu_G = \left( \frac{\frac{M_A}{F_V} - 0,159 * P - \frac{D_{Km}}{2} * \mu_K}{0,578 * d_2} \right). \quad (2)$$

Verta paminėti, kad  $W$  yra ne tik veržlės svoris, kaip atrodytų iš pat pradžių, tačiau didžioji dalis šios dedamosios yra tempimo jėga, kuri susidaro užveržiant sujungimą. Esant normalioms sąlygoms ramybės būsenoje toks kūnas (šiuo atveju sriegis) visiškai nejudėtų, tačiau tokiam junginiui suteikus dinamines apkrovas (1.2 b) paveiksle parodyta dviguba rodyklė) kūnas praranda trinties jėgą tarp paviršių ir likusi jėga, kuri nori stumti kūną žemyn (tempimo jėga, kuri spaudžia veržlę žemyn) priveržia kūną judėti. Taip srieginiame sujungime yra praranda pradinė įvarža ir sujungimas tampa nebeefektyvus.

## 1.2. Mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo

Srieginio sujungimo patikimumas dažnai yra apibūdinamas ir kaip jo gebėjimas išlaikyti tinkamą suspaudimo jėgą tarp veržiamų paviršių (angl. *clamp load*) [10]. Siekiant išlaikyti norimą srieginio sujungimo patikimumą yra naudojamos įvairios papildomos priemonės. Šios priemonės pagal veikimo būdą skirstomos į mechaniskai ir chemiskai veikiančias. Visų pirmiausia aptarsime mechanines apsaugos priemones nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo.

- Karūnuotosios veržlės (kastelinės arba įpjautinės veržlės) (1.3 pav. a))

Detalę aprašantis standartas: DIN 935 / ISO/R288-1. Šios veržlės yra vienintelė mechaninės apsaugos nuo savaiminio atsileidimo priemonė, kurios veikimas yra pagrįstas mechaniniu nejudamu užfiksavimu, o ne papildomos trinties sudarymu. Šios veržlės būtinai turi būti naudojamos su vielokaiščiu (DIN 94 / ISO 1234), kuris užfiksuoja karūnuotąją veržlę reikiamoje vietoje.

Šis apsaugos būdas nėra labai dažnai taikomas dėl pakankamai sudėtingo montavimo proceso bei dėl to, jog šis procesas užima žymiai daugiau laiko nei naudojant kitas priemones. Taip pat šis fiksavimo būdas yra labai neuniversalus: varžtas su pragręžta skykle gali būti naudojamas tik vienoje specifinėje vietoje, kurioje buvo sumontuotas iš pat pradžių, tvirtinimo vieta turi būti labai gerai prieinama, kadangi vielokaiščiui įmontuoti ir išmontuoti reikia gana daug erdvės. Taip pat žvelgiant iš finansinės pusės šis fiksavimo metodas yra gana brangus nes naudojamos dvi atskiros detalės ir

reikalingi papildomi procesai skylės varžte pergręžimui. Taip pat neretai išmontuotą vielokaištį reikia pakeisti nauju, kadangi užlenktos vielokaiščio auselės gali nulūžti.

Šis apsaugos metodas dažniausiai yra naudojamas transporto inžinerijoje guolių ir šarnyrų tvirtinimui.

- Veržlės su nailoniniu žiedu (1.3 pav. b))

Detalę aprašantis standartas: DIN 985 / ISO 10511. Šios veržlės yra žymiai lengviau montuojamos, lyginant su karūnuotomis veržlėmis, kadangi jau nėra naudojamos jokios papildomos priemonės, o tik yra užsukama viena veržlė ant varžto. Šių veržlių apsaugos nuo savaiminio atsileidimo principas yra toks, jog veržlės viršuje esančiame nailoniniame žiede sukančią varžtą susidaro sriegis, kuris sukelia papildomą trintį, trukdančią varžtui lengvai savaimine atsiverti. Veržlės su nailoniniu žiedu yra vienos iš dažniausiai naudojamų priemonių, siekiant apsaugoti srieginius sujungimus nuo savaiminio atsileidimo, tačiau naudojant jas reikia įvertinti kelis faktorius:

- Kadangi nailonas yra poliamidas, jis lydos žymiai mažesnėje temperatūroje nei iš geležies, vario ar kito metalo pagamintos veržlės (lydymosi temperatūra svyruoja nuo 220 iki 265°C), todėl reikia įvertinti, kad tokių veržlių negalima naudoti aukštesiose darbo temperatūrose ir negalima naudoti didelių sukčių elektrinių įrankių jų montavimui;
- Kadangi veržiant veržlę su nailoniniu žiedu yra sudaromas naujas sriegis poliamide todėl turi būti naudojamas didesnis sukimo momentas veržlės užsukimui. Tai reiktų ypač įvertinti, jei nėra gero priejimo prie veržlės.
- Nors ir daugelio gamintojų nėra draudžiamas pakartotinis tokių veržlių naudojimas, tačiau jis nėra patartinas, kadangi tai gali daryti įtaką sujungimo patikimumui. Pakartotinis tokios veržlės naudojimas skatina didesnę nailono dėvėjimąsi, kadangi nailonas yra žymiai minkštesnė medžiaga už geležį, o dėl tokio dėvėjimosi didėja tarpelis tarp nailoninio sriegio ir varžto sriegio, dėl ko sumažėja ir papildoma trintis. Remiantis atliktais tyrimais, toks pakartotinis veržlių naudojimas turėjo įtakos kelioms aviacijos avarijoms [12].

- Dvigubos veržlės (1.3 pav. c))

Srieginių sujungimų fiksavimui taip pat galima naudoti ir dvi užveržiamas veržles. Teoriškai galima naudoti ir dvi vienodas, pavyzdžiui DIN 934 standarto veržles, tačiau ekspertų rekomenduojama [13] naudoti vieną didesnio, o antrą mažesnio aukščio veržles (pavyzdžiui DIN 934 ir DIN 936). Tokio junginio montavimo eiga yra tokia:

- Iš pradžių uždedama plonesnė veržlė ant varžto ir užveržiama 25-50% reikiamu užveržimo momentu. Šis užveržimas suteikia ne pilną pradinę įvaržą jungiamoms detalėms;
- Toliau ant viršaus uždedama storesnė veržlė ir ji užveržiama pilnu užveržimo momentu. Kadangi pirmoji veržlė nebuvo užveržta pilnu užveržimo momentu, todėl reikia, kad varžtui nebuvo suteikta pilna pradinė įvarža, o įveržus storesniąją veržlę pilnu momentu reikiama pradinė įvarža sudaroma tiek ir veržiamoms detalėms ir plonesniajai veržlei.

Dviejų veržlių naudojimas neleidžia varžtui savaimine atsiverti dėl susidarančio varžto sriegio užveržimo – apatinės plonosios veržlės sriegis remiasi į varžto sriegio viršutinę plokštumą, o viršutinės storosios veržlės sriegis remiasi į varžto sriegio apatinę plokštumą, todėl varžtas yra tarsi įstrigęs ir neturi laisvės pajudėti.

- Vienkryptės veržlės (1.3 pav. d))

Detalę aprašantis standartas: DIN 980V / ISO 7042. Šio tipo veržlės vienoje pusėje turi elipsės formos sriegį, dėl to jos vadinamos ir vienkryptės, nes varžtas įsisukti gali tik iš vienos pusės (be papildomos jėgos). Šių veržlių veikimo principas yra toks, jog varžtas įsisukdamas į tokią veržlę pasiekia elipsės formos sriegį ir apvalus varžto sriegis išplečia šį elipsės sriegį taip sudarydamas papildomą įtempį, neleidamas varžtui lengvai atsisukti savaime. Įsisukdamas varžtas į elipsės sriegį nesudaro didesnių nei takumo riba įtempį, todėl yra galimas daugkartinis tokių veržlių panaudojimas.

- Veržlės su metalinėmis plokštelėmis (1.3 pav. e))

Detalę aprašantis standartas: DIN 980M / ISO 7042. Tai labai panašaus tipo veržlės kaip ir veržlės su nailoniniu žiedu. Jų veikimo principas yra paremtas papildomos trinties sudarymu su metalinėmis plokštelėmis. Ant galinio veržlės paviršiaus yra pritvirtintos 2-3 metalinės plokštelės, kurios sukant varžtą įsirežia į varžto sriegį ir įtvirtina jį pozicijoje. Tokių veržlių pakartotinis naudojimas nėra rekomenduojamas, kadangi metalinės plokštelės yra labai plonos ir po kelių užveržimo – atveržimo ciklų pastebimas labai ryškus užveržimo momento pokytis.

- Spyruoklinės poveržlės (1.3 pav. f))

Siekiant užtikrinti pakankamą srieginio sujungimo patikimumą kartu su prieš tai išvardintomis veržlėmis gali būti naudoti ir įvairių rūšių poveržlės. Vienos iš jų yra spyruoklinės arba skeltos poveržlės. Detalę aprašantis standartas: DIN 127 / ISO 7090. Šių poveržlių veikimo principas yra paremtas spyruokliavimu – spyruokliavimo jėga kompensuoja surinkimo įvaržos sumažėjimą dėl valkšnumo deformacijos [5 p. 136]. Veržlėje esanti įpjova leidžia neperduoti visų konstrukciją veikiančių dinaminių apkrovų į srieginį sujungimą. Tačiau paskutiniu metu šios poveržlės yra naudojamos vis mažiau, kadangi įvairūs tyrimai [15] parodė, kad jos nėra labai efektyvios sugeriant dideles dinamines apkrovas ir dažnai surinkimo procesuose tokios poveržlės yra perveržiamos ir jos išsiskečia, dėl ko yra prarandamas spyruokliavimo efektas.

- Fiksuojančios poveržlės (1.3 pav. g))

Detalę aprašantis standartas: DIN 6798 / 6797. Šio tipo poveržlės montavimo metu geba įsirežti į kontaktuojantį paviršių dėl ant jos esančių smulkių vienakrypčių dantukų. Tokio tipo poveržlės dažniau yra naudojamos elektronikoje įrenginių įžeminimui, tačiau jas galima pritaikyti ir smulkiojoje mechanikoje. Įsiveržę dantukai į kontaktuojantį paviršių sudaro papildomą trintį ir neleidžia srieginiam sujungimui paprastai atsileisti. Vienas iš pagrindinių šio tipo poveržlių trūkumų yra tai, jog įsiverždamos į paviršių jos pažeidžia jį ir jeigu vėliau jos yra nuimamos, matomos žymės.

- Pleišto užraktas (Wedge Lock) (1.3 pav. h))

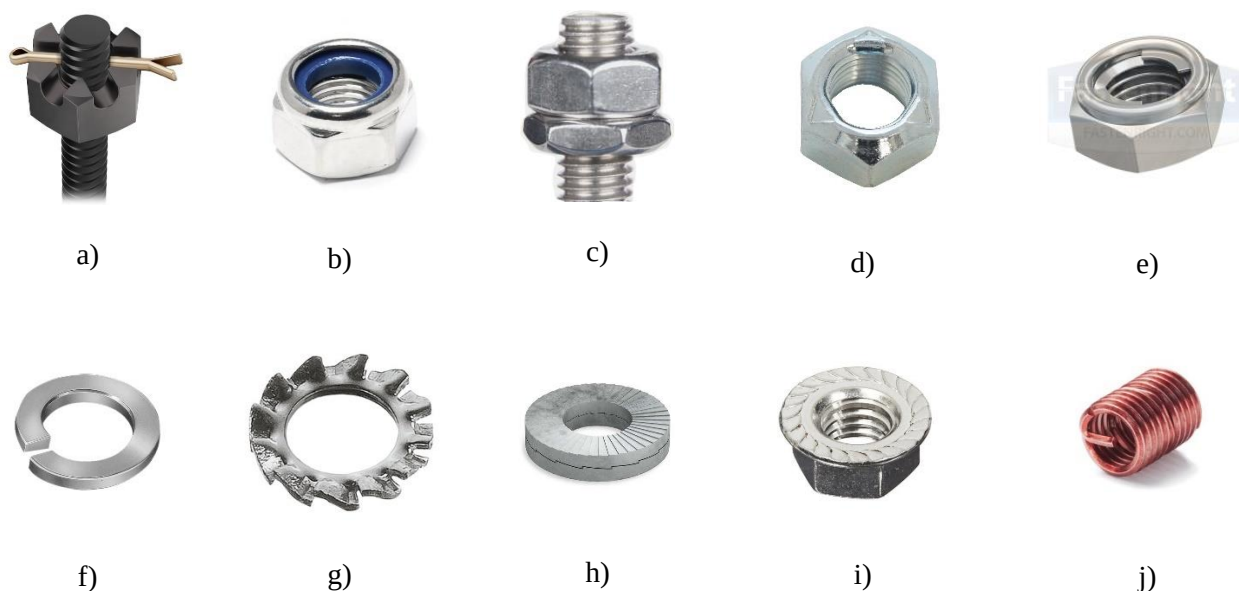
Detalę aprašantis standartas: DIN 25201. Tai yra užpatentuotas gamintojo „NordLock“ produktas. Šio tipo poveržlių yra dvigubas veikimo principas. Pirmasis - ant išorinių paviršių esantys dantukai veikia kaip fiksuojančios poveržlės – įsiveržusios į kontaktuojantį paviršių sudaro papildomą trintį srieginiam sujungimui. Antrasis – šios poveržlės yra sudarytos iš dviejų poveržlių, kurių vidiniai paviršiai turi kelių laipsnių posvyrio vienkryptes nuožulas. Užveržiant sujungimą reikiama pradine įvaržą šios poveržlės tarpusavyje yra perveržiamos, o jeigu varžtas pradeda prasisukinėti dėl dinaminių apkrovų, poveržlės tarpusavyje pasisuka nuožulų kryptimi, dėl ko varžtas yra nuolatos tempiama aukštyr ir taip yra išlaikoma pradinė jo įvarža.

- Varžtai / veržlės su dantyta jungė (1.3 pav. i))

Detalę aprašantis standartas: DIN 6921 (varžtai) ir DIN 6923 (veržlės). Šių priemonių veikimo principas yra panašus kaip ir fiksuojančių poveržlių – ant varžto ar veržlės jungių yra sudarytas dantytas paviršius kuris sudaro papildomą trintį. Lyginant su fiksuojančio poveržlės šių priemonių vienas iš didžiausių privalumų yra tai, jog tai yra viena detalė, o ne kelios atskiros, kas žymiai palengvina surinkimo procesą.

- „Heli-Coil“ įdėklai (1.3 pav. j))

„Heli-Coil“ įdėklai – tai specialūs, spiralės formos įdėklai, kurie montuojasi jau į išgręžtą ir įsriegtą skylę. Dažnai tokios priemonės yra naudojamos siekiant ištaisyti defektą, kai buvo padarytas netinkamo diametro sriegis, nes šis komponentas leidžia sumažinti sriegio dydį per vieną ar kelis dydžius. Srieginių sujungimų fiksavimui naudojami fiksuojantys įdėklai, nes juose sriegis išeina iš spiralės linijos kas montuojant varžtą sukelia papildomus įtempius ir trintį tarp sriegių, kurie neleidžia varžtui lengvai savaime atsileisti.



**1.3 pav.** Mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo [15]

### 1.3. Cheminės apsaugos priemonės nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo

Kaip alternatyva visoms mechaninėms srieginių sujungimų savaiminio atsileidimo priemonėms dažnai yra naudojami sriegių klėjai (angl. *Threadlocker*). Tokie klėjai yra anaerobiniai polimeriniai junginiai, kurie pagrindines savo fiksavimo savybes įgyja nesant sąlyčiui su oru. Kai klėjai turi pakankamą kontaktą su oru jie išlieka skysti, tačiau užtepus klijų ant sriegių paviršių ir patekus jiems į smulkius tarpelius tarp vidinio ir išorinio sriegių, kur oro koncentracija yra labai maža, jie įgauna kietą reaktoplastiko pavidalą, kuris sukelia papildomą trintį, trukdančią laisvai srieginiam sujungimui savaime atsipalaiduoti, lygiai taip pat kaip ir su kai kuriomis mechaninėmis apsaugos priemonėmis.

Visus anaerobinius srieginių sujungimų klėjus detalčiau apibūdina du dydžiai – atsukimo momento (angl. *Breakaway torque*) ir klampos (angl. *Viscosity*) vertės. Atsukimo momento vertė – tai sukimo momento dydis, reikalingas atsukti anaerobiniais klėjais suklijuotą ir visiškai sustingusį srieginį

sujungimą, kuriam nebuvo suteikta jokia pradinė įvarža. Vertinant pagal atsukimo momento vertę klįjus galima išskirstyti į trys grupes ir pagal jas nuspręsti, kokios būtent rūšies klįjų reikia – silpnos, vidutinės ar stiprios fiksacijos. Klįjų klampa nusako kaip lengvai klįjai gali patekti į ertmes tarp sriegių. Dažniausiai silpnos fiksacijos klįjų klampa būna mažiausia, o stiprios fiksacijos didžiausia.

Kaip pagrindinius anaerobinių klįjų pritaikymo privalumus būtų galima išskirti:

- sudaroma papildoma trintis, kuri neleidžia srieginiam sujungimui paprastai atsileisti veikiant dinaminėms apkrovoms;
- nėra reikalingas papildomų komponentų naudojimas kaip dirbant su mechaninėmis priemonėmis, todėl naudojimas yra žymiai paprastesnis ir patogesnis sunkiai prieinamose vietose;
- rinkoje siūlomas didelis pasirinkimas klįjų pagal skirtingus poreikius: mažo, vidutinio ar didelio irimo sukimo momento, atsparūs aukštai temperatūrai, skirtingos klampos ir kt.;
- panaikinami oro tarpai tarp sriegių paviršių, todėl yra sumažinama tikimybė, kad sujungimas pradės minimaliai judėti veikiant dinaminėms apkrovoms;
- anaerobiniai klįjai taip pat veikia kaip ir hermetikas, kadangi užsandarina srieginį sujungimą taip neleidamas patekti drėgmei ir galimai prasidėti korozijai;
- dėl mažesnio papildomų komponentų kiekio sumažėja pačio sujungimo kaina.

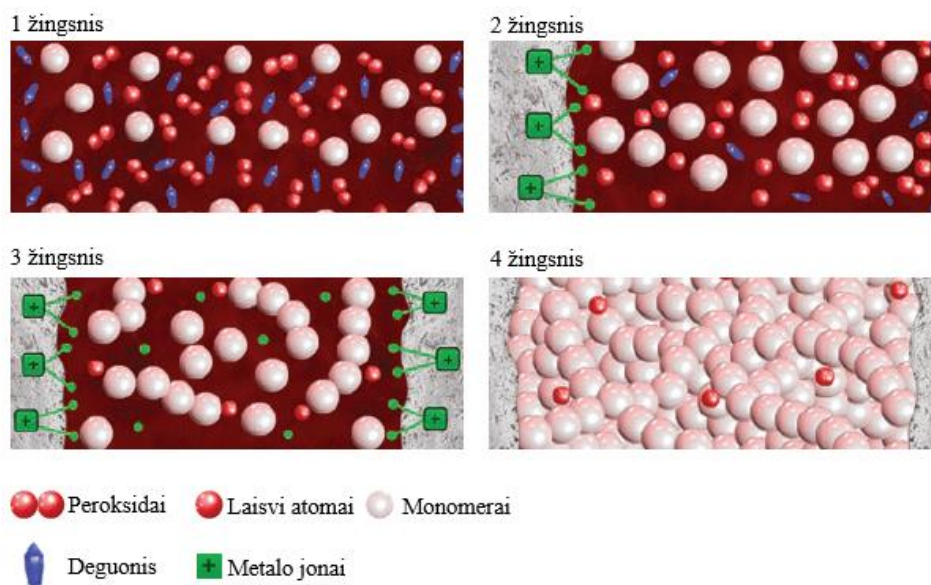
Vienas iš pagrindinių anaerobinių klįjų trūkumų yra jautrumas aukštoms temperatūroms. Didžiosios dalies rinkoje siūlomų anaerobinių klįjų aukščiausia darbinė temperatūra siekia 150 °C. Kai kurie gamintojai gali pasiūlyti ir aukštesnėje temperatūroje naudojamus klįjus (iki 340 °C), tačiau projektavimo metu visada derėtų įsivertinti, kokios aukščiausios darbinės temperatūros bus pasiekiamos įrenginyje ir ar galimas tokių priemonių naudojimas.

### **1.3.1. Srieginių sujungimų klįjų cheminis veikimas**

Dažniausiai anaerobinių klįjų sudėtyje yra metakrilato monomerų arba oligomerų [14] ir visi srieginių sujungimų fiksavimo klįjai yra anaerobiniai – vadinasi visas naudingąsias savybes jie įgauna kai neturi sąlyčio su oru. Tai yra dėl to, jog anaerobiniai klįjai lieka nepolimerizuoti kontaktuojant su deguonimi, nes deguonis slopina laisvųjų atomų pritraukimą, kuris yra būtinas polimerų susikūrimui [16]. Anaerobinių klįjų veikimo seka aprašoma keturiais žingsniais:

1. Iš pat pradžių klįjai yra skysti. Kadangi klįjai turi pakankamą kontaktą su oru, monomerai nepritraukia laisvųjų atomų, o peroksidai, taip pat neturi įtakos šio veikimo skatinimui;
2. Ant metalinio varžto yra užtepami anaerobiniai klįjai. Šie klįjai sugeba pritraukti metalo jonus, kurie padeda suskaidyti peroksidus į labai reaktyvius laisvuosius atomus;
3. Kuomet varžtas yra įsukamas į sriegį arba veržlę padidėja klįjų kontaktas su metalu. Dėl šios priežasties iš peroksidų susidaro dar daugiau laisvųjų atomų, jie pradeda reaguoti su monomerais, o monomerai su kitais monomerais. Taip susidaro ištisa polimero grandinė;
4. Augant polimerinių grandinių skaičiui jos pradeda reaguoti viena su kita ir taip susidaro polimerinis reaktoplastinis junginys.

Visa ši seka yra iliustruojama toliau pateiktame paveiksle (žr. 1.4 pav.).



**1.4 pav.** Anaerobinių klijų veikimo seka [17]

### 1.3.2. Srieginių sujungimų klijų veikimas su įvairiomis medžiagomis

Kaip buvo minėta anksčiau, tinkamam anaerobinių klijų veikimui reikia ne tik mažo kontakto su oru, tačiau ir kontakto su metalu, kadangi metalo jonai yra reikalingi polimero susidarymui. Jeigu yra nusprendžiama srieginiuose sujungimuose naudoti anaerobinius kljus yra labai svarbu įsivertinti ar sujungimuose naudojamos medžiagos yra pakankamai aktyvios su cheminiais kljais. Toliau yra pateikiama lentelė (žr. 1.1 lentelė) su „Loctite“ gamintojo rekomenduojamomis medžiagomis, naudojant anaerobinius kljus.

**1.1 lentelė.** Įvairių medžiagų veikimas su anaerobiniais kljais [17]

| Aktyvios medžiagos                                                                                                                 | Pasyvios medžiagos                                                                                                                                                                                                                                                                 | Neaktyvios medžiagos                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Varis<br>Žalvaris<br>Bronza<br>Plienas<br>Nikelis*<br>Manganas<br>Cinko fosfatas<br>Juodasis oksidas<br>Aliuminio lydinis su variu | Mažo vario aliuminio<br>Nerūdijantis plienas<br>Cinkavimas<br>Cinko dichromatas<br>Karštas cinkavimas cinku<br>Cinku dengtas plienas<br>Magnis<br>kadmio<br>Titanas<br>Chrome<br>Nikelis*<br>Skardos<br>Metalų oksidas<br>Chromato sluoksniai<br>Keramika*<br>Sidabras*<br>Auksas* | Anoduotas aliuminis<br>Plastikai<br>Dažytas ir lakuotas<br>baigia<br>Sidabras*<br>Auksas*<br>Keramika* |
| Greitas kietėjimas                                                                                                                 | Lėtas kietėjimas                                                                                                                                                                                                                                                                   | Labai lėtas kietėjimas arba neveikimas                                                                 |

\* - dėl skirtingų medžiagų klasių gali skirtis medžiagos aktyvumas su anaerobiniais kljais

Siekiant kuo geresnio anaerobinių klijų efekto rekomenduojama tinkamai paruošti tvirtinamų detalių paviršius [18]:

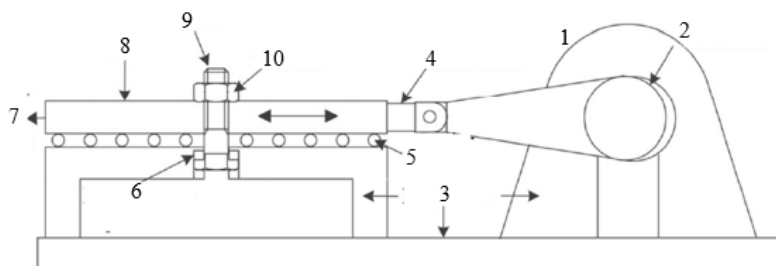
- chloruoto tirpiklio naudojimas;
- riebalų šalinimas garais;
- detalių panardinimas į šarminę vonelę prieš surinkimą.

#### 1.4. Srieginių sujungimų dinaminio apkrovų bandymų metodologijos

Siekiant išsiaiškinti srieginių sujungimų patvarumo ir efektyvumo charakteristikas yra naudojamos kelios skirtingos metodologijos, aprašomos šiais standartais: DIN 65151, ISO 16130:2015 ir NASM 1312-7. Šie standartai vienas nuo kito skiriasi matuojamais dydžiais, naudojamomis bandymų mašinomis, komponentais ir detalėmis, taip pat ir tuo, kokio pobūdžio apkrovomis jie yra veikiami ir kokių rezultatų yra tikimasi. Toliau bus pateikiami kiekvieno bandymo standartų aprašymai.

##### 1.4.1. DIN 65151 standartas

Tai yra 1969 metais vokiečių mokslininko Gerhard H. Junker sudaryta tyrimo metodologija, aprašyta knygoje „New Criteria for Self-Loosening of fasteners Under Vibration“ [19] (liet. *Naujasis kriterijus savaiminiam sujungimų atsileidimui veikiant virpesiams*). Čia buvo pirmą kartą aprašyta tiksli tyrimo metodologija, siekiant išsiaiškinti virpesių poveikį savaiminiam srieginių sujungimų atsileidimui. Metodologija buvo paremta hipoteze, kad didžiausią įtaką savaiminiam atsileidimui turi skersinių dinaminio apkrovų suteikimas sujungimui. Remiantis tuo, vokiečių mokslininkas išrado specialią tyrimo mašiną, dabar dar vadinamą kaip Junkerio testo (angl. *Junker test*) mašiną (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. Junkerio testo mašina ir jos konstrukcija [19]

Junkerio testo mašinos konstrukcinės dalys:

1. elektros variklis – naudojamas 3,6 kW galios variklis su V formos diržine perdava ir trimis skirtingais skriemuliais, galinčiais išvystyti skirtingus sukimosi dažnius: 1500, 3000 ir 4500 apsisukimai per minutę;
2. ekscentrikas – skirtas variklio sukamojo judesio transformavimui į tiesiaigį virpesio judesį;
3. korpusas – laikančioji mašinos konstrukcija;
4. tangentinė apkrovos celė – skirta matuoti tangentinės (skersinės) apkrovos dydžiui;
5. ritininiai guoliai – skirti suteikti judrumui tarp mašinos korpuso ir veržiamos plokštės;
6. pradinės įvaržos celė – skirta matuoti pradinės įvaržos pokyčiui testo metu;
7. išilginio poslinkio celė - skirta matuoti išilginio poslinkio pokyčiui;
8. tvirtinama judanti plokštė;
9. testuojamas tvirtinimo varžtas;
10. testuojama tvirtinimo veržlė.

Naudojantis Junkerio testo mašina galima sudaryti pradinės įvaržos pokyčio priklausomybių kreives, vertinant atliktų virpesių ciklų skaičių bei testo atlikimo laiką. Pats pirmasis šios mašinos testas buvo atliktas su trimis skirtingais bandinių komplektais: DIN 933 M10 varžtu, DIN 933 M10 varžtu su spyruokline DIN 128 poveržle ir DIN 6921 M10 varžtu. Varžtams buvo suteikta 2500 N pradinė įvarža, lygi 75% takumo ribai. Virpesių dažnis buvo 50 Hz. Testas laikomas baigtu, kuomet pradinė varžto įvarža pasiekia nulį.

2002 metais Junkerio testas buvo aprašytas standartu DIN 65151, o 2010 metais jis dar kartą buvo pakeistas ir sukurtas DIN 25021 standarto 1-B priedas, kuriame aprašoma, kad atliekant Junkerio testą yra rekomenduojama naudoti pleišto užraktus (Wedge lock), nepakeičiant daugiau nieko pačio bandymo metodologijoje.

#### 1.4.2. ISO 16130:2015 standartas

2021 metais buvo patvirtintas naujas Junkerio testo standartas ISO 16130:2015. Pagrindinė bandymo esmė išliko tokia pati, t.y. išsiaiškinti pradinės įvaržos pokyčio priklausomybę nuo skersinių virpesių, tik pati bandymo procedūra buvo universalesnė, sušvelninti reikalavimai ir nebereikalaujama ypatingo tikslumo. Naujame standarte atsirado tokie pokyčiai (žr. 1.2 lentelė):

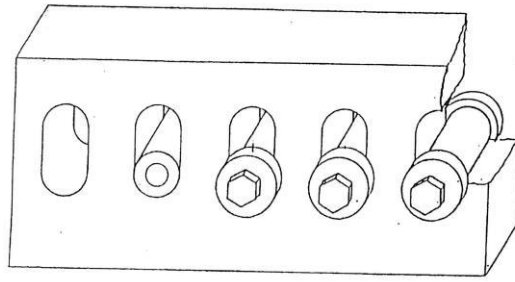
**1.2 lentelė.** Skirtumai tarp DIN 65151 ir ISO 16130:2015 standartų [23]

| Reikalavimai                  | DIN 65151 standartas                                          | ISO 16130:2015 standartas                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Virpesių dažnis               | 12,5 Hz                                                       | 12,5 Hz su galimybe jį keisti ribose nuo 10 iki 15 Hz su $\pm 3\%$ paklaida                                                                                                            |
| Įvaržos matavimo paklaida     | $\pm 0,6\%$                                                   | $\pm 2\%$                                                                                                                                                                              |
| Matuojami dydžiai             | Pradinė įvarža, išilginis poslinkis                           | Pradinė įvarža, išilginis poslinkis, testavimo temperatūra, maksimalus savaime užsifiksuojantis užveržimo momentas, maksimalus savaime užsifiksuojantis užveržimo momentas po bandymo. |
| Testo patikimumo įvertinimas  | -                                                             | Mažiausiai trys bandymai turi būti atlikti                                                                                                                                             |
| Detalių antrinis panaudojimas | Negalimas                                                     | Galimas, jeigu nėra vizualių pažeidimų                                                                                                                                                 |
| Testo vertinimo kriterijai    | Ciklų skaičiaus limitas, visiškas pradinės įvaržos praradimas | Ciklų skaičiaus limitas, visiškas pradinės įvaržos praradimas, užsibrėžto pradinės įvaržos sumažėjimo pasiekimas.                                                                      |

#### 1.4.3. NASM 1312-7 standartas

Tai yra 1997 metais Aeronautikos pramoninkų asociacijos (angl. *Aerospace Industries Association* – AIA) sukurtas srieginių sujungimų bandymo metodas, kuris paremtas junginių veikimu smūginėmis apkrovomis [21]. Lyginant su pirmaisiais dviem standartais, šis metodas yra paprastesnis, kadangi jam atlikti nėra reikalinga speciali Junkerio testo mašina, o naudojamas universalesnis įrenginys – virpesių stendas. Testas atliekamas su virpesių stendu formuojant sinusinius vertikalios krypties (statmenos srieginio sujungimo ašiai) virpesius, kurių dažnis yra lygus 30 Hz ir amplitudė siekia  $11,43 \pm 0,381$  mm (nuo piko iki piko).

Šiam bandymui atlikti reikalingas specialus bandymo stendas, vaizduojamas 1.6 pav.



**1.6 pav.** NASM 1312-7 standarto bandymo stendas [21]

Priklausomai nuo to, kokio dydžio tvirtinimo detalės yra naudojamos bandyme, testavimo stendas turi būti suprojektuotas individualiai remiantis standarte aprašytomis rekomendacijomis:

- skirtumas tarp cilindro išorinio skersmens ir bandymo stendo griovelio aukščio turėtų būti lygus 0,745 colio (18,923 mm);
- skirtumas tarp cilindro išorinio skersmens ir bandymo stendo griovelio pločio turėtų būti toks, jog būtų užtikrintas laisvas cilindro judėjimas;
- surinkto junginio centrinė ašis turėtų būti statmena virpesių stendo centrinei ašiai viso testavimo metu, t.y. junginio masė turi būti gerai išcentruota, jog veikiant virpesiams abu junginio galai judėtų tolygiai;
- tuščiaavidurio cilindro skerspjuvio plotas turėtų būti bent 2,5 karto didesnis už centrinės cilindro skylės plotą:

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - C^2) \geq \frac{1,5\pi C^2}{4} \rightarrow D^2 \geq 2,5C^2 \quad (3)$$

čia  $D$  – cilindro išorinis skersmuo, mm;  $C$  – cilindro vidinis skersmuo, mm.

Bandymas laikomas baigtu, kuomet varžto arba veržlės prasisukimas atsileidžiant yra daugiau nei  $360^\circ$ . Nors ir lyginant su Junkerio testu, šiame metode nėra matuojama tiesioginė pradinės įvaržos priklausomybė nuo virpesių ciklų skaičiaus realiu laiku, tačiau šis metodas leidžia pamatyti kaip srieginiai sujungimai reaguoja į kitokias apkrovas nei tik Junkerio teste. Mokslininko Sawa [22] atliktame abiejų metodų palyginime buvo pastebėta, kad nors vykdant Junkerio testą visos mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio atsileidimo parodė tenkinamus rezultatus, tas pačias priemones naudojant NASM standarto bandyme, vienintelės vienakryptės veržlės sugebėjo išlaikyti reikiamą pradinę įvaržą.

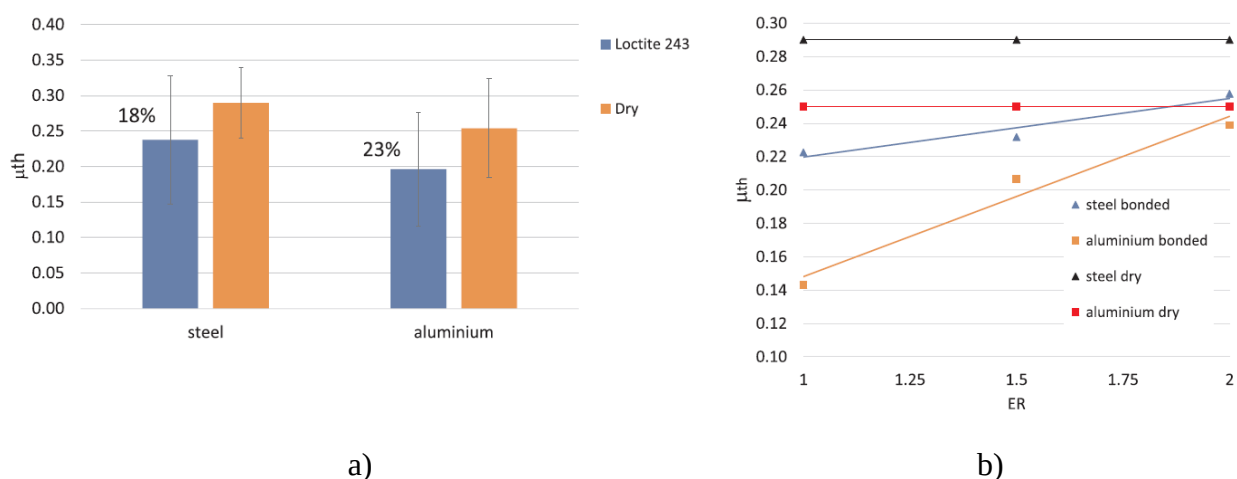
### **1.5. Atliktų tyrimų su cheminėmis apsaugos priemonėmis nuo savaiminio srieginių sujungimų atsileidimo analizė**

Siekiant šiuo tyrimu objektyviai ištirti anaerobinių klijų savybes yra būtina išanalizuoti jau atliktus panašaus pobūdžio tyrimus su klijais, tam kad būtų susipažinta, kokios metodologijos yra taikomos, kokias tyrimų priemones būtų galima pritaikyti šiame tyrime ir susidaryti preliminarą nuomonę, kokių rezultatų galima tikėtis iš tyrimo. Atliekant tokių tyrimų paieška buvo pastebėta, jog tikrai nėra daug tokių mokslinių bandymų susijusių su šia tema. Buvo atrinkti penki tyrimai, kurie suinteresuotai ir pagrįstai tiria anaerobinių klijų savybes bei pateikia objektyvius rezultatus.

### 1.5.1. Anaerobinių klijų įtakos trinties koeficientui tarp sriegių paviršių vertinimas

Kaip jau buvo diskutuota anksčiau, trintis tarp kontaktuojančių sriegių paviršių vaidina gana svarbų vaidmenį kalbant apie savaiminį srieginių sujungimų atsileidimą. Nors ir naudojant cheminius sriegių kljus pagrindinis tikslas yra padidinti trintį tarp sriegių, jog būtų kaip galima daugiau sumažinta savaiminio atsileidimo rizika, tačiau kljams esant skystoje būsenoje jie gali trintį mažinti ir tai taip pat gali turėti tam tikrų privalumų. Būtent tai nagrinėjo Italijos mokslininkų grupė [24]. Šio tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti užveržimo ir atveržimo momentų bei trinties koeficiento priklausomybę nuo varžto sukibimo santykio (angl. *ER – Engagement ratio*), naudojant vidutinės fiksacijos kljus.

Šiame tyrime buvo naudojami DIN 933 klasės M6, M8 ir M10 dydžio varžtai bei dvi skirtingos vidinių sriegių medžiagos, į kuriuos buvo sukami varžtai – konstrukcinis plienas S 275 JR ir aliuminis EN AW 7075. Taip pat varžto įsukimo gyliui buvo naudoti trys sukibimo santykio dydžiai – 1, 1,5 ir 2. Varžtai buvo užsukti tokiais užveržimo momentais: plieninėje detalėje – 11Nm (M6), 27 Nm (M8), 54 Nm (M10), aliumininėje detalėje – 10Nm (M6), 26 Nm (M8), 52 Nm (M10). Trinties koeficientas tarp sriegių buvo skaičiuotas pagal anksčiau minėtą Motosh formulę. Pradinės įvaržos dydžiui matuoti buvo naudoti tenzorezistoriai, sumontuoti ant specialios metalinės įvorės, per kurią ėjo tvirtinamas varžtas.



**1.7 pav.** Trinties koeficiento pokytis naudojant fiksavimo kljus: a) Trinties koeficiento pokytis vertinant pagal naudojamą medžiagą, b) Trinties koeficiento pokytis vertinant pagal sukibimo santykį [24]

Iš gautų tyrimų rezultatų galima matyti, kad fiksavimo klijų naudojimas srieginiuose sujungimuose daro įtaką trinties koeficientui tarp sriegių. Apibendrinti rezultatai (žr. 1.7 pav. a)) rodo, kad naudojant kljus trinties koeficientas plieninėse detalėse sumažėja apie 18 %, o aliuminio detalėse net 23 %. B paveiksle parodomas trinties koeficiento pokytis priklausomai nuo sukibimo santykio. Grafike matoma, kad ties mažesniu sukibimo santykiu fiksavimo kljiai žymiai sumažina trinties koeficientą abejose medžiagose (sumažėja apie 0,1), ir tik jau santykiui padidėjus trinties koeficiento reikšmės pasiekia tokias vertes, kokios būtų be fiksavimo klijų.

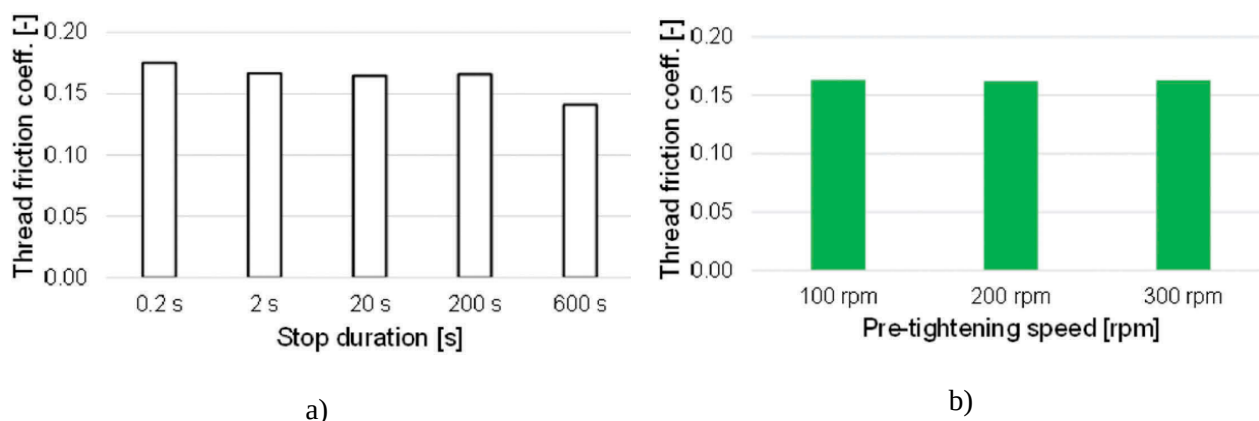
### 1.5.2. Skirtingų montavimo procedūrų įtaka trinties koeficientui naudojant anaerobinius kljus

Tarp sriegių paviršių susidaranti trintis gali būti įtakota ne tik fizinių sriegių ir fiksavimo klijų ypatybių, bet kaip rodo Italijos mokslininkų atliktas tyrimas [27], ir skirtingų srieginių detalių

montavimo procedūrų. Šio tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti, kokią įtaką trinties koeficientui tarp sriegių daro skirtingų veržtų užveržimo greičiai bei skirtingas laiko tarpas tarp pirminio ir galutinio varžto užveržimo. Tyrime buvo naudojami vidutinės ir stiprios fiksacijos klijai „Loctite 243“ ir „Loctite 270“.

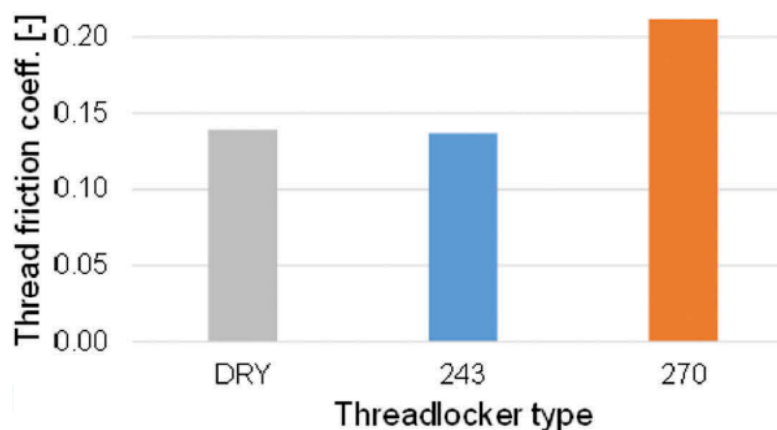
Tyrimas buvo vykdomas keliais etapais iš pradžių vertinant kokią įtaką trinties koeficientui turi pirminio užveržimo greitis. Buvo išskirti trys greičiai: 100, 200, 300 aps./min. Užveržimo greičiai buvo reguliuojami naudojantis „Kistler Analyse“ bandymų mašina.

Antruoju etapu buvo vertinta laiko tarpo tarp pradinio užveržimo ir galutinio užveržimo įtaka trinties koeficientui. Pasak tyrimo autorių. Besiremdami „Volkswagen“ įmonės metodologiją jie išskyrė penkis laiko tarpus tarp pradinio ir galutinio užveržimo, kurie galimi gamybos procesuose: 0,2 s, 2s, 20s, 200s ir 600s.



**1.8 pav.** Montavimo procedūrų įtaka trinties koeficiento tarp sriegio paviršių dydžiui: a) Laiko tarpo tarp pirminio ir galutinio užveržimo, b) Pirminio užveržimo greičio [27]

Apibendrintuose tyrimo rezultatuose (žr. 1.8 pav.) matomas anaerobinių klijų poveikis trinties koeficientui tarp sriegių paviršių. Vertinant laiko tarpo tarp pirminio ir galutinio užveržimo įtaką matoma, kad didesnis tarpo išlaikymas lemia mažesnį trinties koeficientą. Pasak tyrėjų, tai yra dėl didėjančios galimybės anaerobiniam skysčiui užpildyti oro tarpelius tarp sriegių ir taip padengti didesnę paviršiaus plotą. Taip pat matomas žymiai ryškesnis trinties koeficiento pamažėjimas ties 600s riba yra siejamas su politetrafluoreteno (PTFE) dalelėmis, kurios pasižymi geromis tepimo savybėmis. Nors yra pažymima, kad 600s tarpas gamybiniuose procesuose yra gana didelis, tačiau tai taip pat yra įžvelgiama kaip ir galimybė įterpti kitus procesus į šį tarpą. Žvelgiant į pradinio užveržimo greičio įtaką trinties koeficientui, matoma, kad jis neturi beveik jokios įtakos.



**1.9 pav.** Fiksavimo klijų rūšies įtaka trinties koeficientui [27]

Apibendrintai vertinant sriegių fiksavimo klijų įtaką trinties koeficientui (žr. 1.9 pav.) tyrimo grupė priėjo išvados, jog vidutinės fiksacijos klijai labai didelės ir ryškios įtakos trinties koeficientui nedaro. Priešingai nei vidutinės fiksacijos klijai, matomas žymiai didesnis trinties koeficiento padidėjimas naudojant stiprios fiksacijos klijus. Toks padidėjimas galimas dėl pakankamai didelės tokios rūšies klijų klampos, apie kurią jau buvo kalbėta prieš tai.

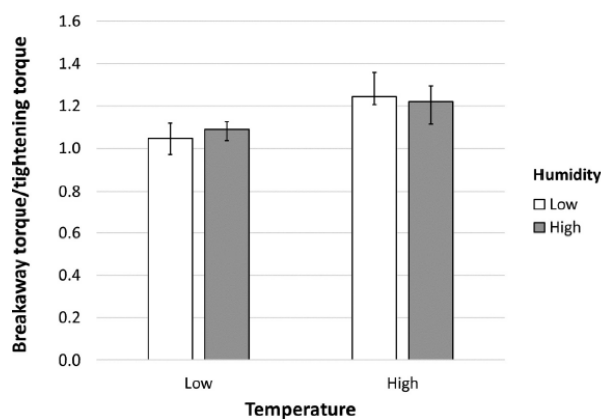
### 1.5.3. Temperatūros ir drėgmės poveikis anaerobinių klijų irimo sukimo momentui

Kaip vienas iš pagrindinių fiksavimo klijų minusų yra įvardijamas jautrumas aukštoms temperatūroms – daugelis fiksavimo klijų virš 150 °C temperatūros praranda savo fiksavimo savybes. Laikant srieginius sujungimus žemesnėje temperatūroje teoriškai neturėtų būti kenksminga, tačiau tai yra naudinga išaiškinti. Tokį tyrimą atliko Italijos mokslininkai [25], vertindami kokį poveikį sriegių fiksavimo klijų savybėms turi ilgalaikė neįprasta aplinkos temperatūra ir drėgmė (žr. 1.3 lentelė).

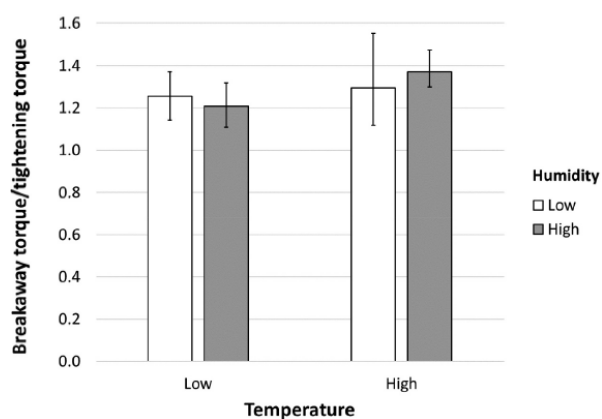
Šiame tyrime buvo naudojami dviejų stiprumo klasių fiksavimo klijai – vidutinio stiprumo „Loctite 243“ ir didelio stiprumo „Loctite 277“. Bandiniai buvo užveržti, išlaikomi savaitės laikotarpį keturiuose skirtinguose aplinkos režimuose ir po išlaikymo buvo matuojamos varžto atsukimo momento vertės (angl. *Breakaway torque*)

**1.3 lentelė.** Ilgalaikės temperatūros ir drėgmės poveikio tyrimo sąlygos [25]

| Laikymo sąlygos                     | Klijų stingimo/<br>fiksacijos<br>sąlygos | Temperatūra,<br>°C | Santykinis<br>drėgnumas,<br>% | Išlai-<br>kymo<br>lai-<br>kas | Ban-<br>dinių<br>skai-<br>čius |
|-------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Žema temperatūra ir maža drėgmė     | 20 °C<br>temperatūroje<br>72 valandas    | 20                 | 20                            | 7d.                           | 5                              |
| Žema temperatūra ir didelė drėgmė   |                                          | 35                 | 90                            |                               |                                |
| Aukšta temperatūra ir maža drėgmė   |                                          | 90                 | 20                            |                               |                                |
| Aukšta temperatūra ir didelė drėgmė |                                          | 90                 | 90                            |                               |                                |



a)



b)

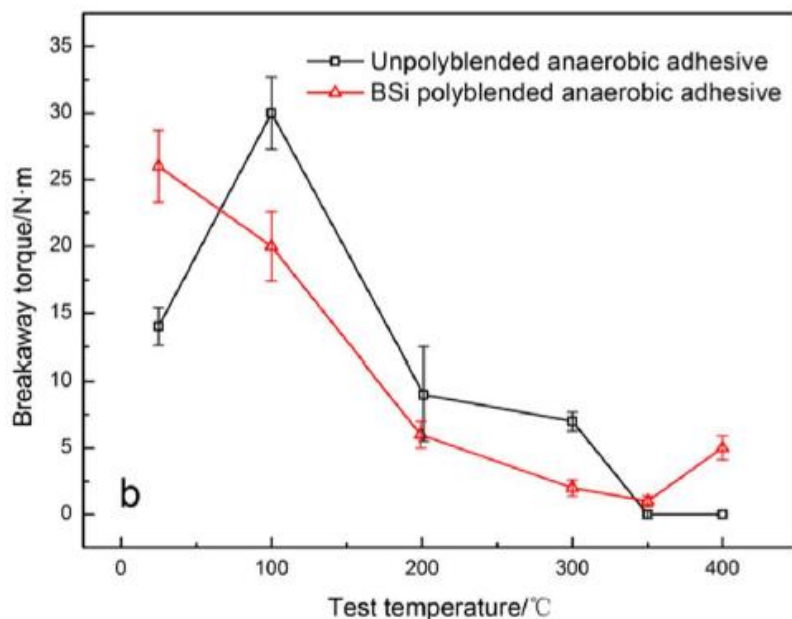
**1.10 pav.** Ilgalaikės temperatūros ir drėgmės poveikio tyrimo rezultatai: a) su „Loctite 243“, b) su „Loctite 270“ [25]

Gauti tyrimo rezultatai (žr. 1.10 pav.) parodo gana netikėtą priklausomybę, jog abiejų stiprumo klasių junginių atsukimo momento vertės yra didesnės išlaikius bandinį aukštesnėje temperatūroje, o ne žemesnėje. Priklausomybėje nuo aplinkos drėgmės lygio tokios tendencijos jau neįžvelgiama. Pavyzdžiui, su vidutinės fiksacijos klėjais žemesnėje temperatūroje didesnis atsukimo momentas yra didesnėje drėgmėje laikyto bandinio, o su stiprios fiksacijos klėjais žemesnėje temperatūroje didesnis atsukimo momentas yra mažesnėje drėgmėje laikyto bandinio, todėl negalima visiškai vienodos priklausomybės abiejų rūšių klėjams. Tačiau apibendrintai būtų galima daryti išvadą, jog optimalios aplinkos sąlygos srieginių sujungimų didžiausiam efektyvumui palaikyti yra aukštesnė temperatūra ir didesnė drėgmė.

#### 1.5.4. Aukštai temperatūrai pritaikytų anaerobinių klijų tobulinimas

Nors ir fiksavimo klijų maksimali darbinė temperatūra yra 150 °C, tačiau įvairiuose gamybiniuose procesuose neišvengiamai gali būti pasiekta žymiai didesnė temperatūra, todėl Kinijos mokslininkų grupė [26] vykdė tyrimą skirtą patobulinti sriegių fiksavimo klįjus ir pritaikyti juos eksploatacijai aukštesnėje, apie 400°C laipsnių temperatūroje.

Tokį tikslą mokslininkų grupė siekė pasiekti į anaerobinius klįjus įvedus boro siloksano oligomera (BSi). Gauti tyrimo rezultatai vaizduojami toliau pateiktame paveiksle.



**1.11 pav.** Anaerobinių klijų tobulinimo aukštoms temperatūroms tyrimo rezultatai [26]

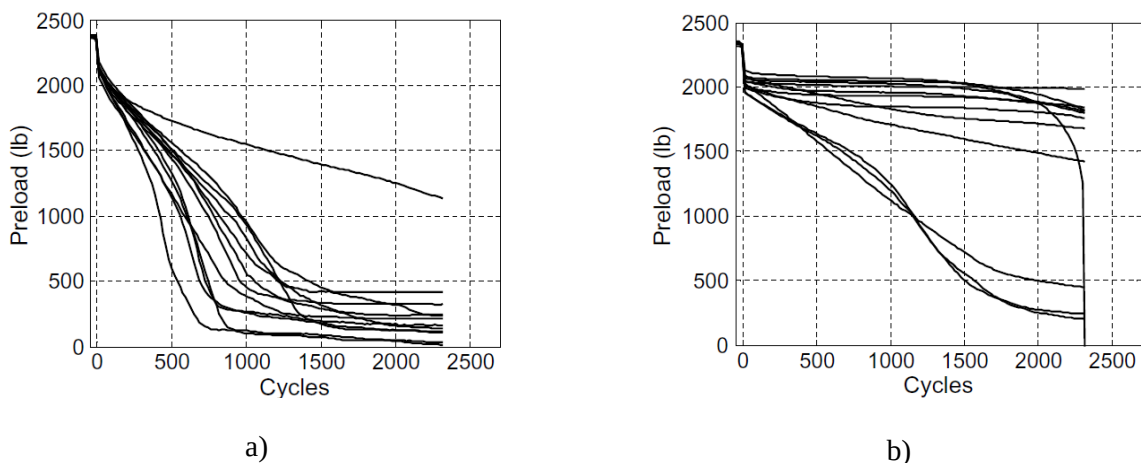
Grafike (žr. 1.11 pav.) vaizduojama srieginio sujungimo prasukimo momento vertės priklausomybė nuo aplinkos temperatūros. Juoda linija pažymėti nemodifikuoti anaerobiniai klijai, raudona – modifikuoti.

Rezultatuose matyti, kad anaerobinių klijų geresnės fiksavimo savybės jau pasižymėjo ir prie žemesnės temperatūros. Ties 20-25 °C temperatūra prasukimo momento skirtumas tarp modifikuotų ir nemodifikuotų klijų skiriasi apie virš 10 Nm. Temperatūrai kylant aukštyr nuo 100 °C priklausomybės beveik susivienodina, šiek tiek geresnes savybes rodo nemodifikuoti klijai ir pasiekus 400 °C temperatūrą matomas modifikuoti klijų prasukimo momento šuolis, atsiranda maždaug 5 Nm skirtumas. Pasak tyrimo mokslininkų, toks reiškinys atsiranda dėl susidarančių kryžminių struktūrų tarp BSi molekulių ir dėl šių struktūrų klijai įgauna geresnes fiksavimo savybes aukštesnėje temperatūroje. Nors ir skirtumas nėra didelis nuo įprastų anaerobinių klijų, tačiau bet minimalus išliekantis prasukimo momentas neleidžia lengvai savaime atsisukti srieginiam sujungimui. Dėl šios priežasties yra praplatinamos anaerobinių klijų pritaikymo galimybės.

#### 1.5.5. Anaerobinių klijų savybių palyginimas su „Heli-Coil“ įdėklais

Kaip buvo minėta anksčiau, norint išlaikyti reikiamą srieginių sujungimų efektyvumą dažnai yra naudojamos ir mechaninės apsaugos priemonės nuo savaiminio atsileidimo. Šių priemonių yra labai didelis pasirinkimas. Kaip pavyzdžiui JAV mokslininkų atliktas palyginamasis tyrimas [28] tarp anaerobinių klijų ir „Heli-Coil“ įdėklų.

Šis tyrimas buvo vykdomas naudojantis DIN 65151 standarto metodologija bandinius veikiant 15 Hz ir 3 mm amplitudės ekscentriniais virpesiais 160 sekundžių arba 2400 ciklų. Bandiniams buvo suteikta pradinė įvarža, lygi 66% bandinio takumo ribai (2400 lb ≈ 1090 kg).



**1.12 pav.** Tyrimo su „Heli-Coil“ įdėklais rezultatai: a) su „Heli-Coil“ fiksuojančiu įdėklu; b) su „Loctite 242“ anaerobiniais klijais [28]

Iš tyrimo rezultatų (žr. 1.12 pav.) matomas ryškus skirtumas tarp „Heli-Coil“ fiksuojančių įdėklų ir anaerobinių klijų fiksavimo savybių siekiant išlaikyti efektyvią srieginio sujungimo pradinę įvaržą. Analizuojant duomenis su „Heli-Coil“ fiksuojančiais įdėklais matoma, jog didžioji dauguma bandinių prarado 50% pradinės įvaržos jau ties 600-800 ciklų riba. Tai parodo, jog šios priemonės fiksuojančios savybės yra labai prastos ir nepatikimos. Vertinant anaerobinių klijų efektyvumą matomos žymiai geresnės savybės. Beveik visi bandiniai iki tyrimo pabaigos (2400 ciklų skaičiaus) išlaiko apie 70% pradinės įvaržos, kas reiškia pakankamai geras fiksavimo savybes. Rezultatuose taip pat matoma, jog trys bandiniai greitai praranda pradinę įvaržą. Tai galėjo lemti netinkamas paviršių paruošimas prieš klijų padengimą arba netinkama klijų padengimas. Vieno bandinio pradinės įvaržos kreivė ties 2324 ciklų staigiai krito žemyn dėl varžto lūžimo. Pasak tyrimo vykdytojų tai parodo, jog bandymo sąlygos yra artimos varžto nuovargio ribai. Nepaisant to, iš tyrimo rezultatų galima daryti išvadą, jog anaerobinių klijų fiksavimo savybės yra ženkliai efektyvesnės už mechaninių fiksavimo priemonių ir dėl to tai turėtų daryti didelę įtaką renkantis naudojamas apsaugos priemonės.

## 1.6. Skyriaus apibendrinimas

Siekiant tinkamai suprasti ir įsigilinti į savaiminio srieginio sujungimo atsileidimo problemą šiame skyriuje buvo išanalizuotos pagrindinės priežastys, dėl ko toks reiškinys gali nutikti bei kaip galima to išvengti arba kaip įmanoma labiau sumažinti tokio reiškinio padarinius. Vertinant šį reiškinį buvo išskirtos dvi pagrindinės priemonės srieginių sujungimų papildomam fiksavimui – mechaninės ir cheminės. Beveik visos mechaninės apsaugos priemonės yra skirtos sudaryti papildomą trintį tarp vidinio ir išorinio sriegių, kuri neleidžia lengvai atsileisti sujungimui. Vienintelės karūnuotosios veržlės standžiai ir nejudamai įtvirtina sujungimą neleidžiant jam atsileisti. Cheminių apsaugos priemonių veikimo principas taip pat yra kaip ir daugelio mechaninių apsaugos priemonių – sudaroma papildoma trintis. Tačiau vykdant atliktų tyrimų apžvalgą buvo nustatyta, jog cheminių priemonių efektyvumas ir pritaikymo galimybės yra žymiai platesnės. Anaerobiniai sriegių klijai parodė geresnes fiksavimo savybes ne tik lyginant su mechaninėmis apsaugos priemonėmis bei veikiant skirtingoms aplinkoms sąlygoms, taip pat ši priemonė mažina ir trintį tarp sriegių, kuri gali daryti įtaką sriegių dilimui ir netiksliam pradinės įvaržos sudarymui. Įvertinus visą išanalizuotą informaciją

nuspręsta šitame tiriamajame projekte nagrinėti anaerobinių klijų savybes, vertinant Lietuvos rinkoje siūlomus produktus ir lyginant jų ypatybes.

Analizuojant literatūros šaltinius taip pat išskirtos trys metodologijos, skirtos srieginių sujungimų efektyvumui vertinti: DIN 65151, ISO 16130:2015 ir NASM 1312-7. Pirmosios dvi metodologijos yra skirtos vertinti srieginius sujungimus juos veikiant skersinėmis dinaminėmis apkrovomis, o paskutinioji – veikiant smūginėms apkrovoms. Įvertinus universitete turimą įrangą bei kitas galimybes nuspręsta dalį iš planuojamų tyrimų vykdyti remiantis NASM 1312-7 metodologija. Visi planuojami vykdyti tyrimai ir jų metodologijos yra aprašomos kitame skyriuje.

## 2. Tyrimų metodologijų sudarymas

Šiame baigiamajame magistro projekte atliekami 3 bandymai, siekiant išsiaiškinti pagrindines, Lietuvos rinkoje siūlomų anaerobinių klijų, savybes:

1. Irimo sukimo momento patikrinimo bandymas, siekiant palyginti gamintojo deklaruojamas vertes realiomis darbo sąlygomis;
2. Terminio poveikio tyrimas, trumpalaikiai atkaitinant anaerobinius klįjus iki maksimalios leistinos darbinės temperatūros ir leidžiant jiems vėl sukietėti;
3. Dinaminis bandymas, siekiant išsiaiškinti smūginių apkrovų poveikį su anaerobiniais klįjais surinktam junginiui;

### 2.1. Tyrimų bandinių ir naudojamos įrangos parinkimas

#### 2.1.1. Anaerobinių klijų parinkimas

Visiems aukščiau išvardintiems tyrimams buvo pasirinkta naudoti trijų skirtingų prekinį ženklų, vidutinės ir stiprios fiksacijos anaerobinius klįjus, kurie yra tiekiami Lietuvos rinkai:

- „A prekinis ženklas“ (Turkija), pagrindinis tiekėjas Lietuvoje\* UAB „Drūtsraigtis“;
- „B prekinis ženklas“ (JAV), pagrindinis tiekėjas Lietuvoje\* UAB „Stokker“;
- „C prekinis ženklas“ (JAV), pagrindinis tiekėjas Lietuvoje\* UAB „Eoltas“.

Pagrindinės pasirinktų klijų specifikacijos ir kainos pateikiamos 2.1 lentelė 2.2 lentelėse:

2.1 lentelė. Vidutinės fiksacijos klijų palyginimas

| Pavadinimas          | Darbinė temperatūra | Irimo sukimo momentas M10 varžtui | Pradinės/ pilnos fiksacijos laikas. | Kaina**       |
|----------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| „A prekinis ženklas“ | Nuo -60°C iki 150°C | 20 Nm                             | 15 min / 24 val.                    | 0,72 €/10 ml  |
| „B prekinis ženklas“ | Nuo -55°C iki 150°C | 26 Nm                             | 10 min / 24 val.                    | 11,26 €/10 ml |
| „C prekinis ženklas“ | Nuo -54°C iki 150°C | 20 Nm                             | 20 min / 24 val.                    | 5,1 €/10 ml   |

2.2 lentelė. Stiprios fiksacijos klijų palyginimas

| Pavadinimas          | Darbinė temperatūra | Irimo sukimo momentas M10 varžtui | Pradinės/ pilnos fiksacijos laikas. | Kaina**       |
|----------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| „A prekinis ženklas“ | Nuo -55°C iki 150°C | 35 Nm                             | 15 min / 24 val.                    | 0,96 €/10 ml  |
| „B prekinis ženklas“ | Nuo -55°C iki 150°C | 32 Nm                             | 45 min / 24 val.                    | 13,50 €/10 ml |
| „C prekinis ženklas“ | Nuo -54°C iki 150°C | 28 Nm                             | 20 min / 24 val.                    | 9,17 €/10 ml  |

\* - pagrindinis tiekėjas Lietuvoje nustatytas pagal didžiausią gamintojo produktų pasiūlą;

\*\* - kainos tikrintos 2024 m. kovo 20d.

#### 2.1.2. Tvirtinimo detalių parinkimas tyrimui

Tvirtinimo detalių bandiniams parinkimas priklauso nuo vykdomo tyrimo:

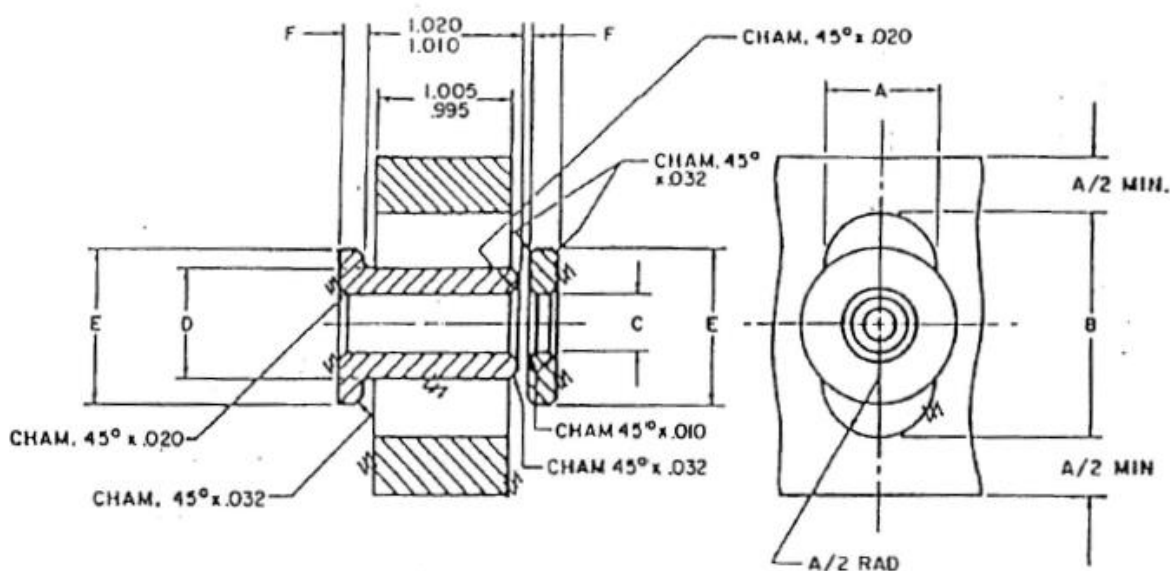
- irimo sukimo momento vertės patikrinimas; terminio poveikio tyrimas: šiuose tyrimuose bus lyginamos gamintojo deklaruojamos ir mūsų bandymų sąlygomis gautos irimo sukimo momento vertės. Kadangi visų gamintojų irimo sukimo momento vertės pateikiamos M10 dydžio tvirtinimo detalėms, todėl tyrimams pasirinkta naudoti po 5 vnt. DIN 933 standarto M10x40 varžtų ir DIN 934 standarto M10 veržlių. Tyrimuose bus naudojamos dviejų rūšių

padengimo tvirtinimo detalės vertinant pagal aktyvumą su anaerobiniais klijais – juodo oksido (aktyvi) ir cinko dangos (pasyvi).

- smūginių apkrovų poveikio tyrimas: dėl tyrimui naudojamo virpesių stendo maksimalių leistinų apkrovų bei dėl NASM 1312-7 standarto apibrėžtų testavimo stendo matmenų buvo pasirinkta naudoti po 3 vnt. DIN 933 standarto M8x50 varžtų, DIN 934 M8 veržlių ir po 6 vnt. DIN 125 M8 poveržlių. Tvirtinimo detalių dydis tyrimo rezultatų tinkamumui įtakos neturės, kadangi jame bus tiriamas ciklų skaičius, ties kuriuo suklijuotas srieginis sujungimas prarandą žymią dalį pradinio užveržimo momento.

### 2.1.3. Dinaminių apkrovų bandymo stendas

Kaip jau buvo minėta anksčiau, dėl susidarančių aplinkybių dinaminis srieginių sujungimų klijų efektyvumo tyrimas bus vykdomas remiantis NASM 1312-7 metodologija. Pagal šią metodologiją turi būti naudojamas specialus bandymo stendas, kuriame surinktiems bandiniams su srieginiais sujungimais būtų suteikiamos smūginės apkrovos ir ribojamas jų poslinkis. Kadangi šiam tyrimui buvo pasirinkta naudoti M8x50 dydžio varžtus, atitinkamai pagal metodologiją bandymo stendo matmenys yra pateikiami 2.1 pav. ir 2.3 lentelėje.

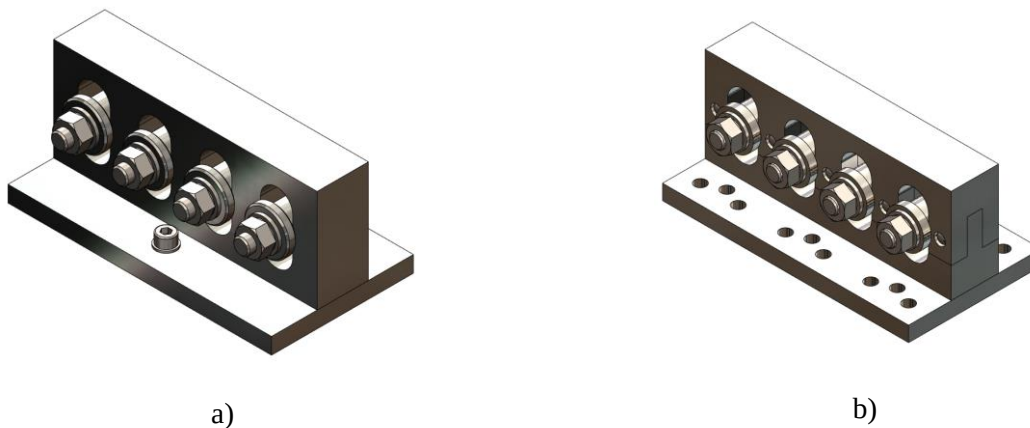


2.1 pav. Dinaminių apkrovų bandymo stendo komponentų matmenys [21]

2.3 lentelė. Testavimo stendo detalių matmenys

|                     | Nominalus tvirtinimo elemento dydis | Griovelio plotis A, mm | Griovelio aukštis B, mm | Poveržlės ir cilindro vidinis skersmuo C, mm | Cilindro išorinis skersmuo D, mm | Poveržlės išorinis skersmuo E, mm | Poveržlės storis F, mm |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Galima paklaida, mm | -                                   | +0,127<br>-0,05        | ±0,05                   | ±0,05                                        | ±0,05                            | ±0,127                            | ±0,05                  |
| -                   | 7,95 (M8)                           | 16,0                   | 34,0                    | 8,3                                          | 15,7                             | 20,0                              | 4,0                    |

Atliekant pirminius bandymus su stendu buvo pastebėta, kad norint atlikti vieną bandymą yra užtrunkama labai daug laiko, nes srieginiai komponentai su anaerobiniais klizais turi būti surenkami jau įstatyti į stendą ir kol klizai stingsta 72 valandas tas stendas negali būti naudojamas tyrimams. Todėl buvo nuspręsta perprojektuoti bandymo stendą taip, jog jis būtų išardomas ir į jį būtų galima įstatyti jau iš anksto paruoštus junginius su sukietėjusiais anaerobiniais klizais (žr. 2.2 pav.).



**2.2 pav.** Dinaminių apkrovų bandymo stendas: a) neišardomas stendas; b) išardomas stendas

Bandymo stendas gaminamas iš konstrukcinio plieno S275J0, bendra stendo masė su bandiniais lygi 1590 gramų. Išardžius ir surinkus atgal stendas į reikiamą poziciją surenkamas naudojant DIN 7979 kaiščius. Techniniai bandymo stendo brėžiniai pateikiami prieduose.

#### 2.1.4. Naudojama bandymų įranga

Testuojamų bandinių irimo sukimo momentui matuoti bus naudojamas „Gunt“ įmonės sukimo momento testavimo mašina WP 510 (žr. 2.3 pav.) [34]. Ši mašina leidžia matuoti sukimo momentą iki 200 Nm ir taip rinktis keturis skirtingus sukimo greičius: 50, 100, 200 ir 500 laipsnių per minutę. Remiantis apžvelgtais tyrimais bei pirminiais bandymais buvo nuspręsta, kad bandinių atsukimo greitis bus lygus 200 laipsnių per minutę.



**2.3 pav.** Sukimo momento testavimo mašina „Gunt WP 510“

Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimui vykdyti buvo pasirinkta naudoti virpesių žadintuvą „Tira TV 54216-130“ (žr. 2.10 pav.) [35]. Šis įrenginys sugeba sugeneruoti virpesius nuo 2 Hz iki 3,5 kHz, kurių maksimalus greitis galimas 1,5 m/s, o amplitudė (nuo piko iki piko) siekia 25,4 mm. Kadangi pagal NASM 1312-7 metodologiją reikalaujama pasiekti 30 Hz dažnį bei apie 11 mm amplitudę, todėl šis įrenginys bandymui tinkamas.

Prieš vykdant dinaminių smūginių apkrovų bandymą tiriamiesiems bandiniams reikia suteikti pradinę įvaržą, reikalaujamą pagal ISO 898-1 standartą, todėl tiksliai užsukimo momentui matuoti naudojamas dinamometrinis raktas „Wera Click-Torque 2-25 Nm“ [36].

Terminio poveikio tyrimui vykdyti bus naudojama džiovinimo kamera „SNOL 58/350“ [37]. Maksimali galima šios krosnies darbinė temperatūra yra 300 °C, kuri yra pakankama, kadangi tyrimo bandiniai turės būti išlaikomi 150 °C temperatūroje 5 minutes.

## **2.2. Tyrimų vykdymo sekos ir nurodymai**

### **2.2.1. Irimo sukimo momento patikrinimo bandymo vykdymo seka**

Irimo sukimo momento tyrimas buvo vykdomas siekiant palyginti gamintojų deklaruojamas irimo sukimo vertes M10 varžtams su vertėmis, gautomis vykdant tyrimą sąlygomis, labiau artimesnėmis realioms darbo sąlygoms. Šio tyrimo seka buvo tokia:

1. Paruošiama po 5 vnt. DIN 933 standarto M10x40 varžtų ir 5 vnt. DIN 934 standarto M10 veržlių, padengtų cinko ir juodo oksido danga;
2. Naudojant industrinę riebalų valiklį Art. Nr. 089 108 7 [33] kruopščiai nuvalomi varžtų ir veržlių srieginiai paviršiai nuo nešvarumų ir dulkių;
3. Nuvalytiems komponentams leidžiama 10 minučių išdžiūti, kad išgaruotų galimi valiklio likučiai;
4. Ant varžto 3, 4 ir 5 sriegio vijų užlašiname anaerobinių klijų taip, jog būtų padengtos visos trys vijos (žr. 2.4 pav.) (pagal gamintojo rekomendacijas M10 varžtams reikia naudoti 0,1 ml klijų, kas apytiksliai yra trys pilnai padengtos vijos);



**2.4 pav.** M10 varžtų padengimas kliais

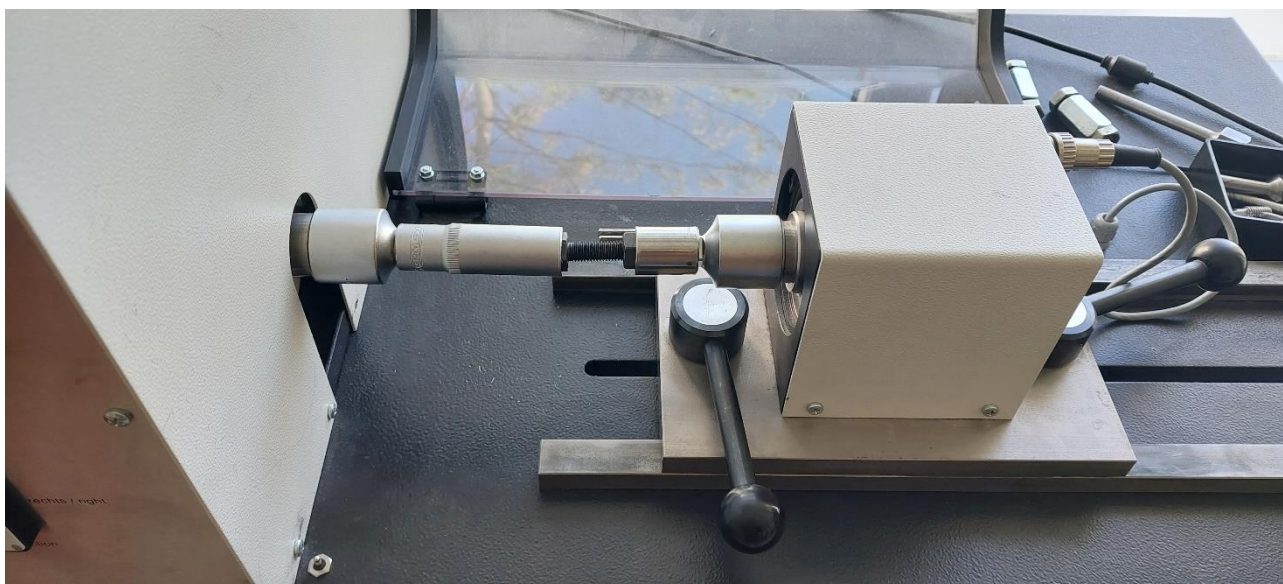
5. Ant kliais užtepto varžto užsukama veržlė taip, kad ji praeitų pro visą kliais padengta paviršiu ir po veržle matytųsi smulkūs klijų likučiai;
6. Pakartojami 4 ir 5 žingsniai su visais penkiais bandiniais ir su 6 skirtingų rūšių kliais. Iš viso gaunami 60 vnt. bandinių;

7. Suklijuoti bandiniai paliekami džiuoti 20-24 °C temperatūroje mažiausiai 72 valandas (žr. 2.5 pav.);



**2.5 pav.** Suklijuoti bandiniai

8. Praėjus reikiamam laikui kljams išdžiūti bandiniai yra testuojami laboratorijoje su „Gunt WP 510“ sukimo momento testavimo mašina ir reikiama programine įranga;
9. Bandinys įdedamas į testavimo mašinos griebtus taip, kad varžto galvutė būtų įtvirtinta besisukančioje dalyje, o veržlė – stacionarioje dalyje, matuojančioje sukimo momento vertę (žr. 2.6 pav.);



**2.6 pav.** Irimo sukimo momento tyrimo bandinys įtvirtintas sukimo momento testavimo mašinoje

10. Testavimo mašina nustatoma suktis 200 laipsnių per minutę greičiu ir paleidžiama;
11. Programinė įranga kompiuterio ekrane brėžia sukimo momento priklausomybę nuo veržlės pasisukimo kampo. Didžiausias sukimo momento pikas fiksuojamas kaip kljų irimo sukimo

momentas, o sukimo momento verčių vidurkis nuo piko kritimo iki 360 laipsnių apsisukimo fiksuojamas kaip vyraujantis sukimo momentas;

12. 9-11 žingsniai pakartojami su visais 60 bandinių, fiksuojant aptartas sukimo momento vertes ir vizualiai įvertinant, kokie pokyčiai yra matomi.

### 2.2.2. Terminio poveikio bandymo vykdymo seka

Terminio poveikio tyrimas buvo vykdomas siekiant išsiaiškinti leidžiamos maksimalios klijų darbinės temperatūros poveikį klijų fiksavimo savybėms. Šio tyrimo seka buvo tokia:

1. Paruošiama po 5 vnt. DIN 933 standarto M10x40 varžtų ir 5 vnt. DIN 934 standarto M10 veržlių, padengtų cinko ir juodo oksido danga;
2. Naudojant industrinį riebalų valiklį Art. Nr. 089 108 7 [33] kruopščiai nuvalomi varžtų ir veržlių srieginiai paviršiai nuo nešvarumų ir dulkių;
3. Nuvalytiems komponentams leidžiama 10 minučių išdžiūti, kad išgaruotų galimi valiklio likučiai;
4. Ant varžto 3, 4 ir 5 sriegio vijų užlašiname anaerobinių klijų taip, jog būtų padengtos visos trys vijos (pagal gamintojo rekomendacijas M10 varžtams reikia naudoti 0,1 ml klijų, kas apytiksliai yra trys pilnai padengtos vijos);
5. Ant klijais užtepto varžto užsukama veržlė taip, kad ji praeitų pro visą klijais padengta paviršių ir po veržle matytųsi smulkūs klijų likučiai;
6. Pakartojami 4 ir 5 žingsniai su visais penkiais bandiniais ir su 6 skirtingų rūšių klijais. Iš viso gaunami 60 vnt. bandinių;
7. Suklijuoti bandiniai paliekami džiūti 20-24 °C temperatūroje mažiausiai 72 valandas;
8. Praėjus reikiamam laikui klijams išdžiūti paruošti bandiniai yra įdedami į terminę kamerą (žr. 2.7 pav.). Terminėje kameroje bandiniai yra išlaikomi 150 °C temperatūroje 5 minutes;



2.7 pav. Bandinių kaitinimas terminėje kameroje

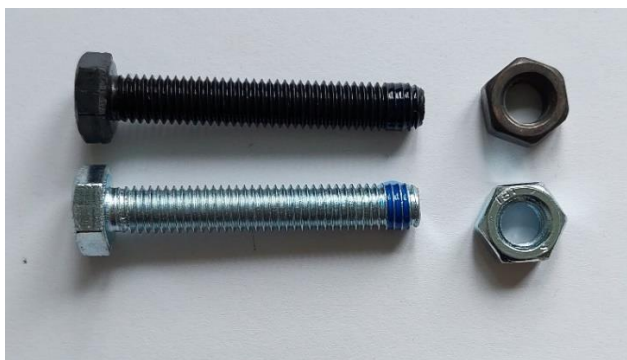
9. Atkaitinus bandinius jie išimami iš terminėje kameros ir jiems vėl leidžiama sustingti mažiausiai 72 valandoms;
10. Praėjus reikiamam laikui klijams išdžiūti bandiniai yra testuojami laboratorijoje su „Gunt WP 510“ sukimo momento testavimo mašina ir reikiama programine įranga;

11. Bandinys įdedamas į testavimo mašinos griebtus taip, kad varžto galvutė būtų įtvirtinta besisukančioje dalyje, o veržlė – stacionarioje dalyje, matuojančioje sukimo momento vertę, taip, kaip ir pirmojo bandymo metu;
12. Testavimo mašina nustatoma suktis 200 laipsnių per minutę greičiu ir paleidžiama;
13. Programinė įranga kompiuterio ekrane brėžia sukimo momento priklausomybę nuo veržlės pasisukimo kampo. Didžiausias sukimo momento pikas fiksuojamas kaip klijų irimo sukimo momentas, o sukimo momento verčių vidurkis nuo piko kritimo iki 360 laipsnių apsisukimo fiksuojamas kaip vyraujantis sukimo momentas;
14. 11-13 žingsniai pakartojami su visais 60 bandinių, fiksuojant aptartas sukimo momento vertes ir vizualiai įvertinant, kokie pokyčiai yra matomi.

### 2.2.3. Dinaminių smūginių apkrovų bandymo vykdymo seka

Smūginių apkrovų tyrimas buvo vykdomas siekiant išsiaiškinti dinaminių išorinių jėgų poveikį klijų fiksavimo savybėms. Šio tyrimo seka buvo tokia:

1. Paruošiama po 3 vnt. DIN 933 standarto M8x50 varžtų, 3 vnt. DIN 934 standarto M8 veržlių, padengtų cinko ir juodo oksido danga ir 6 vnt. DIN 125 standarto poveržlių, dengtų cinko danga;
2. Naudojant industrinį riebalų valiklį Art. Nr. 089 108 7 [33] kruopščiai nuvalomi varžtų ir veržlių srieginiai paviršiai nuo nešvarumų ir dulkių;
3. Nuvalytiems komponentams leidžiama 10 minučių išdžiūti, kad išgaruotų galimi valiklio likučiai;
4. Analogiškai paruošiami 4 vienetai tokių bandinių komplektų, ant kurių nebus tepama jokių klijų (2 vienetai padengti cinko danga ir 2 vienetai padengti juodo oksido danga);
5. Ant varžto 3, 4 ir 5 sriegio vijų užlašiname anaerobinių klijų taip, jog būtų padengtos visos trys vijos (žr. 2.8 pav.);



**2.8 pav.** M8 varžtų padengimas klijais

6. Ant varžto dedama viena DIN 125 poveržlė, tuomet perverinama įvorė, uždedama pagaminta storesnė poveržlė, dar viena DIN 125 poveržlė ir ranka užsukama veržlė (žr. 2.9 pav.);



**2.9 pav.** Smūginių apkrovų bandymo surinktas bandinys

7. Pakartojami 5 ir 6 žingsniai su visais trimis bandiniais ir su 6 skirtingų rūšių klijais ir su keturiais bandiniais be klijų. Iš viso gaunami 40 vnt. bandinių (18 bandinių, dengtų juodu oksidu ir klijais, 2 bandiniai, dengti juodu oksidu be klijų, 18 bandinių, dengtų cinko danga ir klijais ir 2 bandiniai, dengti cinko danga ir be klijų);
8. Naudojantis dinamometriniu raktu bandiniai yra užveržiami 20 Nm pradiniu užveržimo momentu. Veržlės užveržimo momentas patikrinimas pasukant dinamometrinį raktą kelis kartus, kol jis sutraška;
9. Suklijuoti bandiniai paliekami džiūti 20-24 °C temperatūroje mažiausiai 72 valandas;
10. Ant bandinių ties veržle pažymimas smulkus brūkšnelis galimo veržlės prasisukimo indikacijai;
11. Praėjus reikiamam laikui klijams išdžiūti bandiniai yra testuojami laboratorijoje su „Tira TV 54216-130“ virpesių žadintuvu ir reikiama programine įranga (žr. 2.10 pav.);
12. Stendas, naudojant 4 M6 varžtus, pritvirtinamas prie virpesių žadintuvo;
13. Virpesių dažnis nustatomas 30 Hz, o amplitudė 11 mm. Stendas virpinimas 200000 ciklą;

8. Naudojantis dinamometriniu raktu bandiniai yra užveržiami 20 Nm pradiniu užveržimo momentu. Veržlės užveržimo momentas patikrinimas pasukant dinamometrinių raktą kelis kartus, kol jis sutraška;

9. Suklijuoti bandiniai paliekami džiūti 20-24 °C temperatūroje mažiausiai 72 valandas;

10. Ant bandinių ties veržle pažymimas smulkus brūkšnelis galimo veržlės prasisukimo indikacijai;

11. Praėjus reikiamam laikui klijams išdžiūti bandiniai yra testuojami laboratorijoje su „Tira TV 54216-130“ virpesių žadintuvu ir reikiama programine įranga (žr. 2.10 pav.);

12. Stendas, naudojant 4 M6 varžtus, pritvirtinamas prie virpesių žadintuvo;

13. Virpesių dažnis nustatomas 30 Hz, o amplitudė 11 mm. Stendas virpinimas 200000 ciklų;



**2.10 pav.** Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo įranga

Čia paveiksle 1 - kompiuteris su programine įranga; 2 – žemo dažnio virpesių stiprintuvas; 3 – dinaminį smūginių apkrovų bandymo stendas; 4 – virpesių stendas; 5 – kompresorius virpesių stendo aukščio kompensacijai.

14. 12 žingsnis pakartojamas su visais 40 bandinių, išardant testavimo stendą ir pakaitomis sukeičiant paruoštus bandinius;
15. Kai visiems bandiniams atliekamas virpesių testas, bandiniai yra testuojami laboratorijoje su „Gunt WP 510“ sukimo momento testavimo mašina ir reikiama programine įranga;
16. Bandinys įdedamas į testavimo mašinos griebtus taip, kad varžto galvutė būtų įtvirtinta besisukančioje dalyje, o veržlė – stacionarioje dalyje, matuojančioje sukimo momento vertę (žr. 2.11 pav.);



**2.11 pav.** Smūginių apkrovų tyrimo bandinys įtvirtintas sukimo momento testavimo mašinoje

17. Testavimo mašina nustatoma sukis 200 laipsnių per minutę greičiu ir paleidžiama;
18. Programinė įranga kompiuterio ekrane brėžia sukimo momento priklausomybę nuo veržlės pasisukimo kampo. Didžiausias sukimo momento pikas fiksuojamas kaip klijų irimo sukimo momentas, o sukimo momento verčių vidurkis nuo piko kritimo iki 360 laipsnių apsisukimo fiksuojamas kaip vyraujantis sukimo momentas;
19. 15-17 žingsniai pakartojami su visais 40 bandinių, fiksuojant aptartas sukimo momento vertes ir vizualiai įvertinant, kokie pokyčiai yra matomi bei palyginant gautas klijuotų ir neklijuotų bandinių vertes.

### 3. Tyrimų rezultatų analizė

Atlikus tyrimus skirtingų rūšių ir gamintojų anaerobiniai klėjai buvo vertinami pagal tris kriterijus:

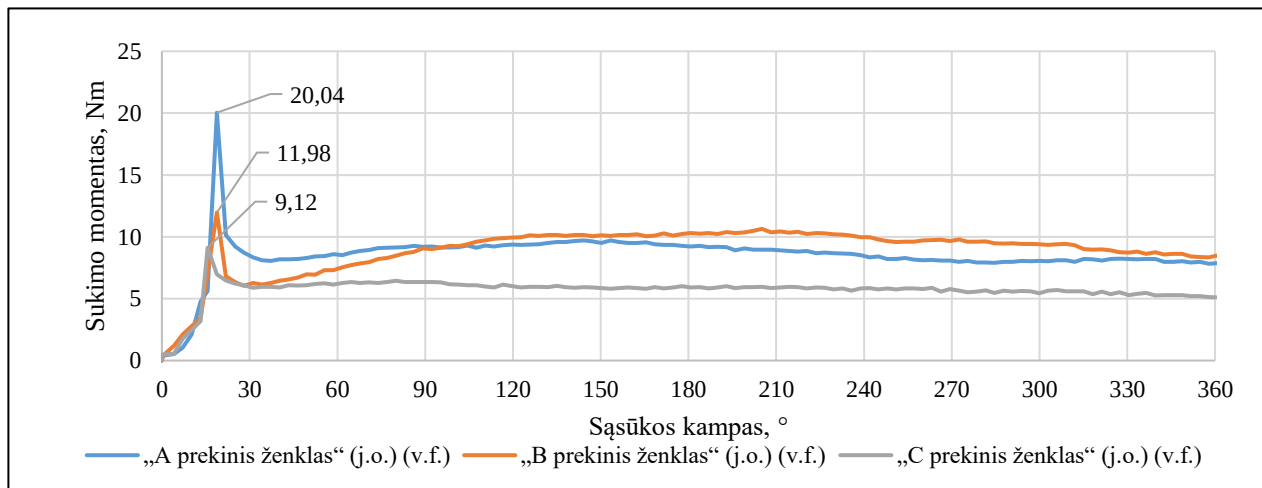
- irimo sukimo momento dydis (jeigu įmanoma nustatyti);
- vyraujantis sukimo momentas;
- klijų pasiskirstymas ant sriegio paviršių (vizualinis įvertinimas).

Aiškesniam gautų duomenų analizavimui ir palyginimui bandiniai buvo išskirstyti į keturias tiriamų objektų grupes pagal detalių padengimo būdą ir naudojamų klijų rūšį:

1. Juodo oksidavimo detalės su silpnos fiksacijos klėjais;
2. Juodo oksidavimo detalės su stiprios fiksacijos klėjais;
3. Karšto cinkavimo detalės su silpnos fiksacijos klėjais;
4. Karšto cinkavimo detalės su stiprios fiksacijos klėjais;

#### 3.1. Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo rezultatai

Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo metu buvo naudojama po 5 skirtingo padengimo bandinius su skirtingų rūšių bei gamintojų klėjais. Tyrimo metu bandinys buvo prasukamas 360 laipsnių. Aukščiausia užfiksuota sukimo momento vertė buvo vertinama kaip irimo sukimo momento vertė, o likusių verčių aritmetinis vidurkis nuo didžiausio užfiksuoto momento iki 360 laipsnių ribos buvo fiksuojamas kaip vyraujantis irimo sukimo momentas. Pagal penkių bandinių rezultatų vidurkius buvo sudarytos sukimo momento pokyčio kreivės. Irimo sukimo momento priklausomybė nuo sąsūkos kampo ir vyraujančio sukimo momento dydžiai su juodai oksiduotomis ir silpnos fiksacijos klėjais klijuotomis detalėmis pateikiami 3.1 pav. ir 3.1 lentelėje.



**3.1 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant vidutinės fiksacijos klėjus su juodai oksiduotomis detalėmis

**3.1 lentelė.** Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klėjais

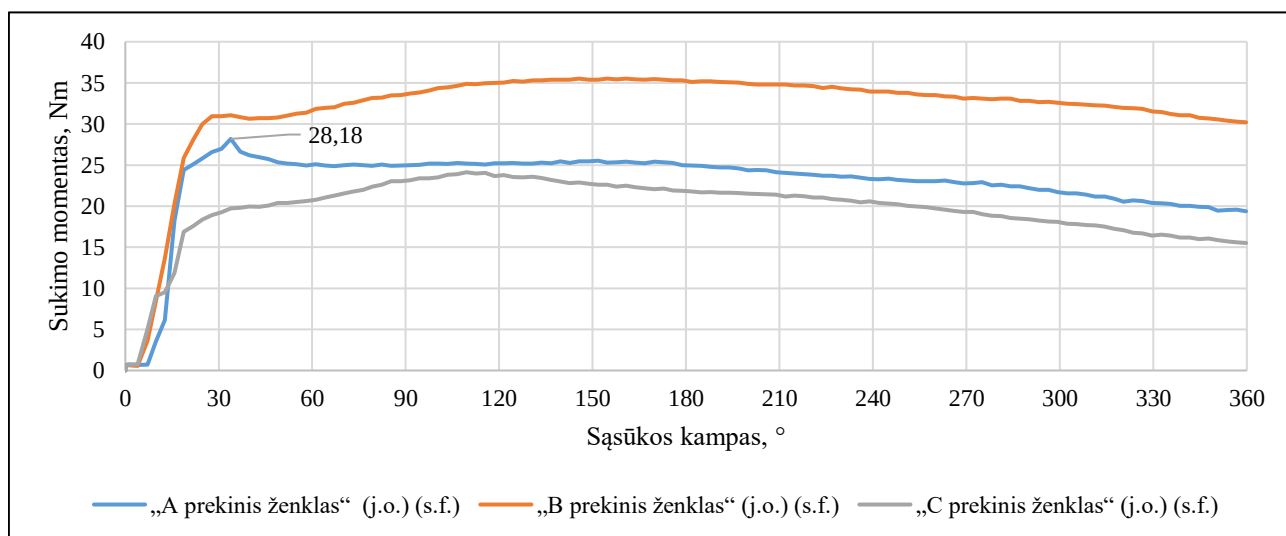
|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 20,04                | 11,98                | 9,12                 |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 8,71                 | 9,20                 | 5,87                 |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,95                 | 0,75                 | 0,37                 |

Gautuose rezultatuose yra matomi ryškūs skirtumai tarp vertinamų skirtingų silpnos fiksacijos klijų prekinį ženklą. Vertinant pagal irimo sukimo momento vertę vieninteliai „A prekinio ženklo“ atitinka techninėje specifikacijoje deklaruojamą 20 Nm momentą. „B prekinio ženklo“ gauta irimo sukimo momento vertė nuo deklaruojamos skiriasi 54,6% (deklaruota vertė 26 Nm), o „C prekinio ženklo“ vertės skiriasi taip pat 54,6% (deklaruota 20 Nm). Žvelgiant iš vienos pusės, tokie verčių nuokrypiai galėtų būti pateisinami dėl to, jog gamintojo deklaruojamos vertės gautos specialiai ruošiant bandinius laboratorijos sąlygomis (naudojamos šarminės vonelės paviršių valymui, stingstant klijams yra palaikoma stabili temperatūra ir drėgmės lygis). Tačiau žvelgiant iš kitos pusės, praktikoje ir realiomis darbo sąlygomis nėra taikomi tokie detalių paruošimo metodai, todėl būtent „A prekinio ženklo“ gamintojo klijai gali būti vertinami kaip geriausi ir realiausiai atitinkantys gamintojo deklaruojamą informaciją.

Vertinant vyraujantį sukimo momentą, „C prekinio ženklo“ klijų gauta vertė yra ypač maža, kuri yra beveik lygi veržlės sukimui ranka, o likusių dviejų gamintojų klijų vyraujančio sukimo momento vertės yra kiek didesnės, kurios neleistų minimaliai atsilaisvinusiam varžtui toliau savaime atsisukinėti veikiant dinaminėms apkrovoms.

Vizualinė bandinių patikra (žr. 3.5 pav. 1,2,3) parodė, kad klijai pasidengė tolygiai per visą veržlės padengiamą plotą ir didžioji dalis klijų likučių liko ant varžto srieginio paviršiaus.

Sekanti tyrimo dalis buvo vykdoma su stiprios fiksacijos klijais padengiant juodai oksiduotas detales. Gauti rezultatai pateikiami 3.2 pav. ir 3.2 lentelėje.



**3.2 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant stiprios fiksacijos kljus su juodai oksiduotomis detalėmis

**3.2 lentelė.** Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos kljais

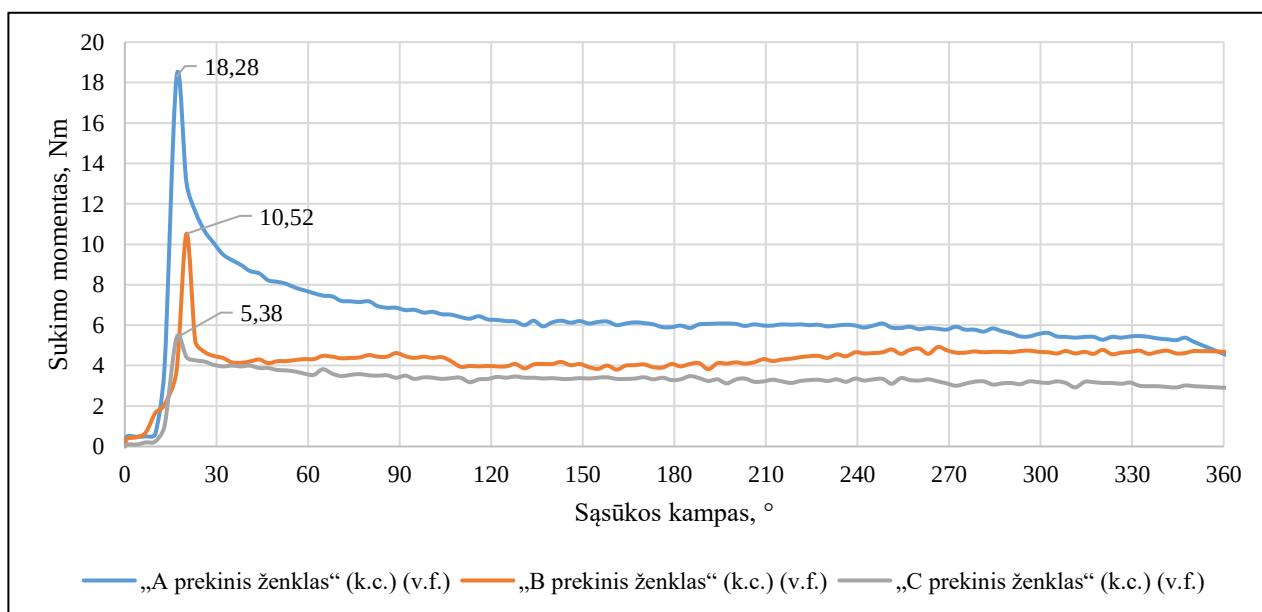
|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 28,18                | -                    | -                    |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 23,68                | 31,45                | 19,37                |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,90                 | -                    | -                    |

Šioje tyrimo dalyje matosi visiškai kitoks stiprios fiksacijos klijų veikimo principas nei silpnos. Visų pirmiausia su stiprios fiksacijos klijais buvo sudėtinga nustatyti tikrąją irimo sukimo momento reikšmę. Su vieninteliais „A prekinio ženklo“ klijais išryškėja irimo sukimo momento vertė, lygi 28,18 Nm, kuri nuo deklaruojamos (35 Nm) skiriasi 19,5 %. Kitų gamintojų irimo sukimo momento vertės nebuvo vertinamos.

Vertinant vyraujančią sukimo momentą matomi ryškūs skirtumai tarp skirtingų gamintojų klijų. Geriausią rezultatą parodė „B prekinio ženklo“ klijai, kurių vyraujantis sukimo momentas yra lygus 31,45 Nm. Tai yra beveik lygu šių klijų irimo sukimo momentui, t.y. maksimaliam atlaikomam sukimo momentui, kas reiškia, jog naudojant šiuos kljus yra įmanoma išlaikyti didelį sujungimo patvarumą bei apsaugą nuo savaiminio atsisukimo. „A prekinio ženklo“ klijų vyraujantis sukimo momentas buvo gautas mažesnis nei pastarųjų klijų – 23,68 Nm, o „C prekinio ženklo“ dar mažesnis – 19,37 Nm.

Vertinant bandinius vizualiai (žr. 3.5 pav. 4,5,6) kaip ir su vidutinės fiksacijos klijais matomas tolygus klijų pasiskirstymas ant paviršių. Tik naudojant „A prekinio ženklo“ (žr. 3.5 pav. 4) kljus matomas mažesnis klijų likučių kiekis ant varžto paviršiaus nei ant kitų bandinių.

Toliau tokio pat pobūdžio tyrimai buvo atlikti su karšto cinkavimo padengimo detalėmis, kurių rezultatai pateikiami 3.3 pav. ir 3.3 lentelėje.



**3.3 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant vidutinės fiksacijos kljus su karštai cinkuotomis detalėmis

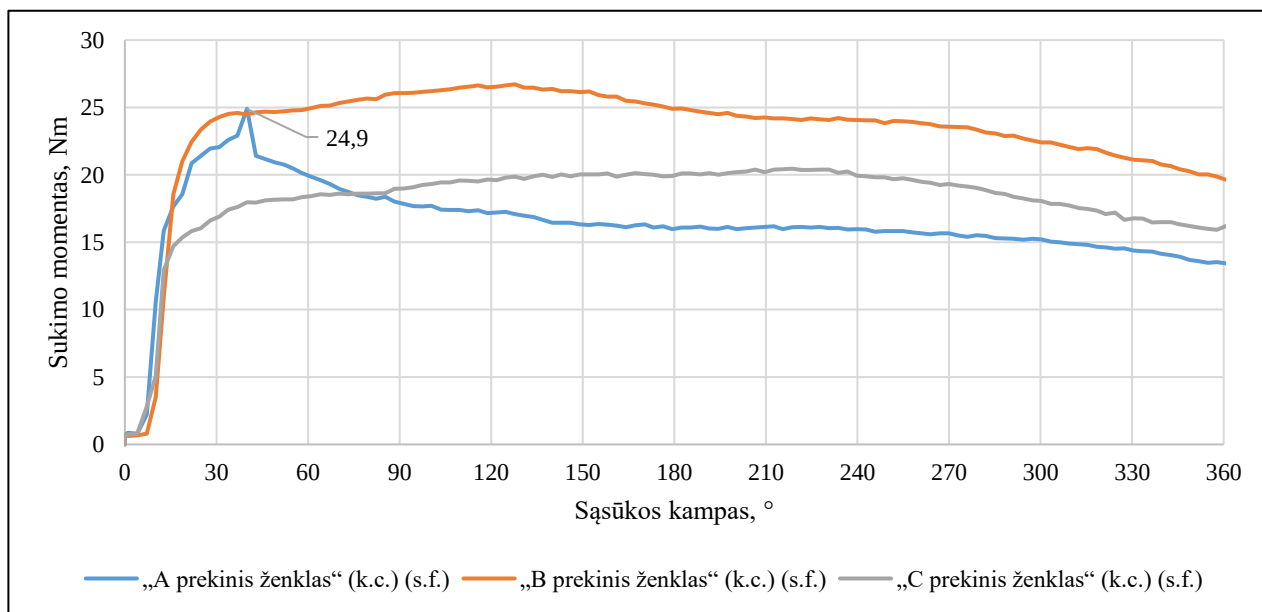
**3.3 lentelė.** Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos kljais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 18,28                | 10,52               | 5,38                 |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 6,44                 | 4,38                | 3,36                 |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,94                 | 0,37                | 0,58                 |

Lyginant tyrimo rezultatus tarp juodai oksiduotų ir karštais cinkuotų bandinių su vidutinės fiksacijos kljais buvo pastebėta, jog „A prekinio ženklo“ kljai parodė gana panašias fiksavimo galimybes su skirtingais detalių padengimais. Taip pat gana panašūs irimo sukimo momento rezultatai buvo gauti ir su „B prekinio ženklo“ kljais ( skirtumas yra lygus apie 1 Nm), tačiau „C prekinio ženklo“ kljai parodė dar prastesnį rezultatą, gautas skirtumas tarp dviejų skirtingų padengimų detalių yra lygus apie 4 Nm.

Vyraujančio sukimo momento analizė tarp skirtingų detalių padengimų parodė tikėtinus rezultatus. Visų tirtų gamintojų kljų vyraujančio sukimo momento verčių skirtumai tarp skirtingų padengimų ir gana panašūs, o didesnė vyraujančio sukimo momento vertė su juodo oksidavimo detalėmis susidaro dėl pačio padengimo fizikinių savybių, kadangi šio padengimo detalės tarpusavyje sudaro didesnę trintį nei karštai cinkuotos detalės.

Iš vizualinės išardytų bandinių patikros galime matyti, kad kljų sukibimas su sriegių paviršiumi yra žymiai silpnesnis nei juodai oksiduotų detalių (žr. 3.5 pav. 1,2,3), didžioji dalis kljų likučių nukrito ardant bandinius, tačiau tokia savybė iš vienos pusės gali būti priimtina ir kaip teigiama, jeigu norima tokius varžtus panaudotinai naudoti, kadangi mažesnis kljų likučių kiekis mažiau keičia srieginio paviršiaus geometriją.



**3.4 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė normaliomis sąlygomis, naudojant stiprios fiksacijos kljus su karštai cinkuotomis detalėmis

**3.4 lentelė.** Irimo sukimo momento patikrinimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos kljais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 24,9                 | -                    | -                    |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 16,37                | 22,84                | 17,89                |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,81                 | -                    | -                    |

Irimo sukimo momento patikrinamo bandymai su karšto cinkavimo bandiniais (žr. 3.4 pav. ir 3.4 lentelė), padengtais stiprios fiksacijos klėjais, taip pat parodė gana panašias charakteristikas kaip ir su juodo oksidavimo bandiniais. Šiame bandyme su vieninteliais „A prekinio ženklo“ klėjais buvo įmanoma nustatyti irimo sukimo momento vertę, lygią 24,9 Nm.

Vyraujančio sukimo momento rezultatų analizė parodė susilpnėjusias klijų fiksavimo savybes lyginant su juodo oksidavimo bandiniais. Didžiausias vyraujantis sukimo momentas buvo fiksuotas su „B prekinio ženklo“ klėjais, kuris buvo lygus 22,84 Nm (apie 9 Nm mažesnis nei su juodo oksidavimo bandiniais). Likusių dviejų klijų gamintojų vyraujantys sukimo momentai buvo nustatyti jau kiek mažesni, tačiau galima įžvelgti tai, jog „C prekinio ženklo“ klėjai išlaiko gana panašias fiksavimo savybes tiek su juodo oksidavimo, tiek ir su karšto cinkavimo bandiniais (atitinkamai vyraujančio sukimo momento rezultatai buvo lygūs 19,37 Nm ir 17,89 Nm)

Vizualinė bandinių patikra neparodė jokių ryškių skirtumų tarp juodo oksidavimo ir karšto cinkavimo bandinių, visų gamintojų klėjai yra pasiskirstę tolygiai ant sriegio paviršiaus ir didžioji dalis klijų likučių yra likus ant varžto.



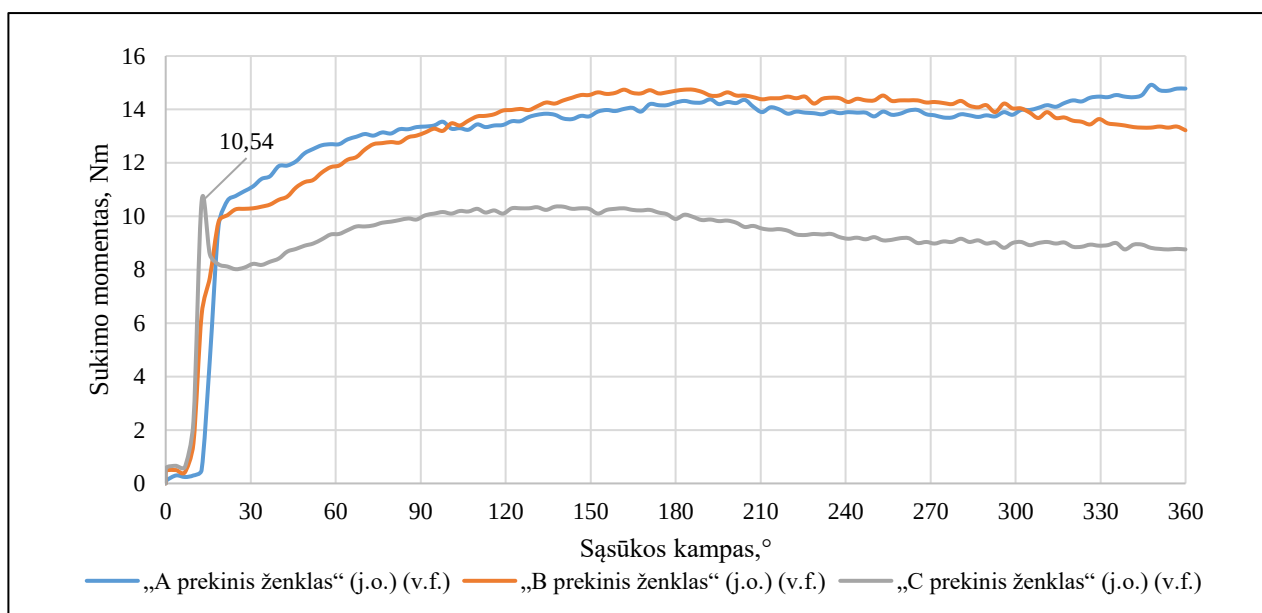
**3.5 pav.** Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo bandiniai po išardymo

Paveiksle vaizduojami srieginiai sujungimai su skirtingais fiksavimo klėjais: 1- „A prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 2- „B prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 3- „C prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 4- „A prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 5- „B prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 6- „C prekinis ženklas (stipri fiksacija)“.

Toliau analizuojami rezultatai, gauti atliekant tokio paties pobūdžio tyrimas, tik vertinant bandinius po terminio poveikio.

### **3.2. Terminio poveikio tyrimo rezultatai**

Antrasis vykdytas tyrimas su anaerobiniais srieginių sujungimų klėjais buvo terminio poveikio tyrimas. Kaip ir Irimo sukimo momento patikrinimo tyrimo metu, taip ir šiame buvo naudojama po 5 skirtingo padengimo bandinius su skirtingų rūšių bei gamintojų klėjais. Tyrimo metu bandinys buvo prasukamas 360 laipsnių. Aukščiausia užfiksuota sukimo momento vertė buvo vertinama kaip irimo sukimo momento vertė, o likusių verčių aritmetinis vidurkis nuo didžiausio užfiksuoto momento iki 360 laipsnių ribos buvo fiksuojamas kaip vyraujantis irimo sukimo momentas. Šio tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti trumpalaikės maksimalios klijų darbinės temperatūros poveikį jų fiksavimo savybėms, simuliuojant situaciją, jog eksploatacijos metu dėl tam tikrų priežasčių trumpam laikui užkyla įrenginio ar tam tikro mazgo temperatūra.



**3.6 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant vidutinės fiksacijos klįjus su juodai oksiduotomis detalėmis

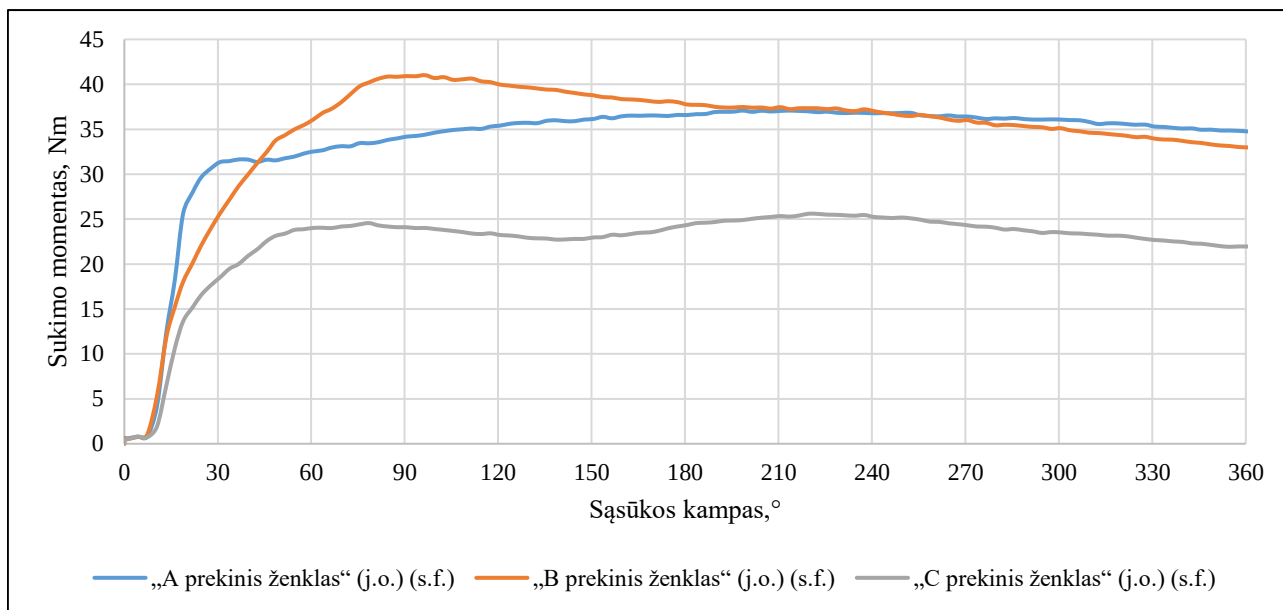
**3.5 lentelė.** Terminio poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klįjais

|                                                    | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                              | -                    | -                    | 10,54                |
| Vyraujantis sukimo momentas                        | 12,75                | 12,79                | 9,41                 |
| Irimo sukimo momento domenų standartinis nuokrypis | -                    | -                    | 0,96                 |

Analizuojant juodo oksidavimo bandinius su vidutinės fiksacijos klįjais po terminio poveikio (žr. 3.6 pav. ir 3.5 lentelė) iš karto matosi pasikeitusios „A prekinio ženklo“ ir „B prekinio ženklo“ charakteristikos. Šių klįjų charakteristikose ne tik neišryškėja irimo sukimo momento vertės, tačiau ir sukimo momento vertės po 360 laipsnių sąsūkos kampo nepradedą nė kiek mažėti. Tyrimo rezultatai naudojant „C prekinio ženklo“ klįjus parodo ryškesnę irimo sukimo momento vertę, tačiau tolimesnės sukimo momento vertės parodo tokią pačią tendenciją kaip ir pirmųjų dviejų klįjų – vertės nepradedą staigiai mažėti prie 360 laipsnių sąsūkos kampo ribos.

Vyraujančio sukimo momento vertės taip pat parodo didelį pokytį nuo įprasto tyrimo verčių (žr. 3.1 pav.). Visų klįjų gamintojų vyraujančio sukimo momento vertės padidėjo 4-5 Nm, kas parodo, jog trumpalaikis klįjų paveikimas maksimalią darbinę temperatūrą turi netgi teigiamą poveikį klįjų fiksavimo savybėms.

Vertinant išardytus bandinius vizualiai matomas tolygus klįjų pasiskirstymas per sriegio paviršių (3.10 pav. 1, 2, 3). Didžioji dalis klįjų likučių liko ant varžto paviršiaus.



**3.7 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant stiprios fiksacijos klįjus su juodai oksiduotomis detalėmis

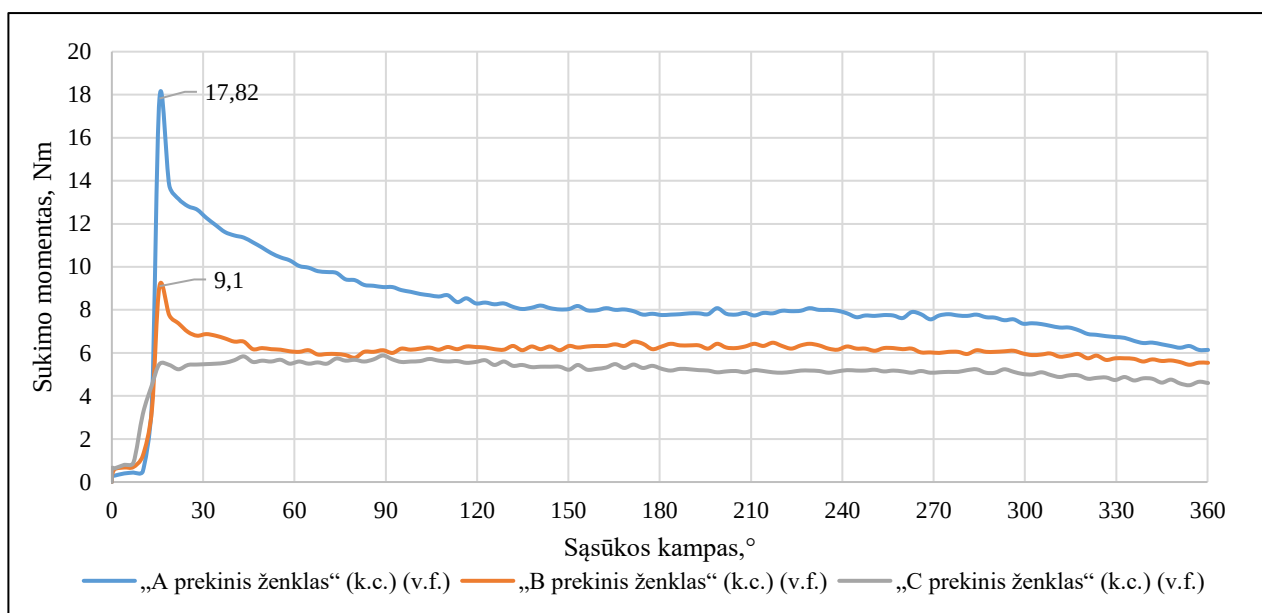
**3.6 lentelė.** Terminio poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klįjais

|                             | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas       | -                    | -                    | -                    |
| Vyraujantis sukimo momentas | 33,16                | 34,04                | 22,05                |

Stiprios fiksacijos klįjų charakteristikos pakaitinus maksimalia darbine temperatūra jau nebe taip ryškiai skyrėsi nuo įprastomis sąlygomis vykdyto tyrimo (žr. 3.7 pav. ir 3.6 lentelė). Čia taip pat neišryškėjo irimo sukimo momento vertės.

Vertinant vyraujančio sukimo momento vertes galima jau išvelgti didesnių skirtumų. Ryškiausias vyraujančios sukimo momento pokytis matomas su „A prekinio ženklo“ klįjais. Čia sukimo momento vertė padidėjo 28,6% (nuo 23,68 Nm iki 33,16 Nm). Likusių dviejų gamintojų klįjų vyraujančio momento vertės nepakito tiek daug, skirtumas yra lygus apie 3 Nm.

Vizualinė bandinių patikra (žr. 3.10 pav. 4, 5, 6) parodė tokius pačius rezultatus kaip ir vidutinės fiksacijos klįjai – matomas tolygus klįjų pasiskirstymas per sriegio paviršių ir didesnis klįjų likučių kiekis ant varžto sriegio.



**3.8 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant vidutinės fiksacijos klįjus su karštais cinkuotomis detalėmis

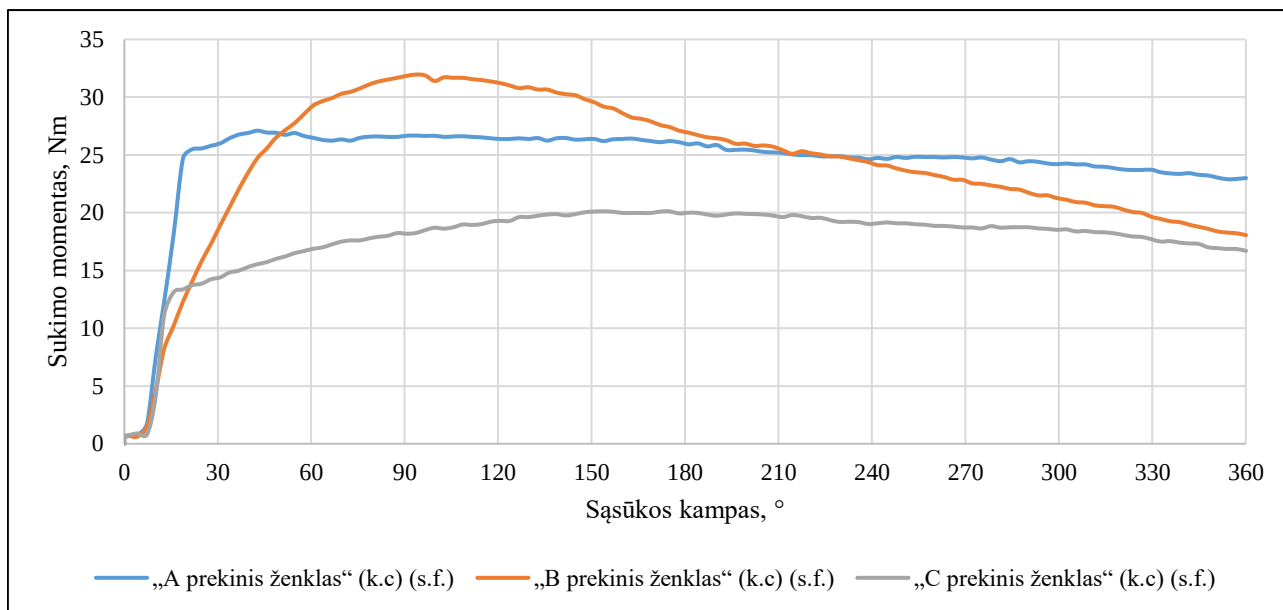
**3.7 lentelė.** Terminio poveikio tyrimo rezultatai su karštais cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klįjais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 17,82                | 9,1                  | -                    |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 8,37                 | 6,17                 | 5,05                 |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,97                 | 0,94                 | -                    |

Vertinant irimo sukimo momento vertes su karštais cinkuotais bandiniais (žr. 3.8 pav. ir 3.7 lentelė) matomas atvirkštinis trumpalaikės maksimalios darbinės temperatūros poveikis klįjų stiprumui. Nors juodo oksidavimo bandiniams klįjų charakteristikos (tiek irimo sukimo momentas, tiek vyraujantis sukimo momentas) padidėjo, karšto cinkavimo bandiniams irimo sukimo momentas sumažėjo. „A prekinio ženklo“ klįjams irimo sukimo momentas sumažėjo 2,88 Nm, „B prekinio ženklo“ klįjams – 1,67 Nm, o „C prekinio ženklo“ klįjams deja nepavyko nustatyti tikslaus irimo sukimo momento po terminio poveikio.

Kita vertus, terminis poveikis vyraujančiam sukimo momentui jau turėjo tam tikrų teigiamų pokyčių. Visų gamintojų klįjams šis dydis padidėjo apie 2 Nm: „A prekinio ženklo“ klįjams – 1,93 Nm, „B prekinio ženklo“ klįjams – 1,79 Nm, o „C prekinio ženklo“ – 1,69 Nm.

Vizualiai patikrinus išardytus bandinius (žr. 3.10 pav. 1, 2, 3) buvo matomas tolygus klįjų pasiskirstymas išskyrus su „C prekinio ženklo“ klįjais – ardant bandinius nukrito žymus kiekis klįjų likučių.



**3.9 pav.** Irimo sukimo momento priklausomybė nuo terminio poveikio naudojant stiprios fiksacijos klįjus su karštais cinkuotomis detalėmis

**3.8 lentelė.** Terminio poveikio tyrimo rezultatai su karštais cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klįjais

|                             | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Irimo sukimo momentas       | -                    | -                    | -                    |
| Vyraujantis sukimo momentas | 24,06                | 23,76                | 17,56                |

Karštai cinkuoti bandiniai su stiprios fiksacijos klįjais po terminio poveikio parodė panašias fiksavimo charakteristikas (žr. 3.9 pav. ir 3.8 lentelė) kaip ir juodo oksidavimo bandiniai – nebuvo įmanoma nustatyti tikslios irimo sukimo momento vertės. Su visų gamintojų klįjais matomas staigus sukimo momento didėjimas, o po to tolygus ir lėtas jo kritimas.

Vyraujančio sukimo momento analizė taip pat parodė labai panašius pokyčius kaip ir juodai oksiduoti bandiniai, lyginant su įprastomis sąlygomis atliktais bandymais. Didžiausias vyraujančio sukimo momento pokytis matomas su „A prekinio ženklo“ klįjais – jis padidėjo nuo 16,37 Nm iki 24,06 Nm. Su kitų gamintojų klįjais tokio didelio pokyčio jau negalime matyti – „B prekinio ženklo“ klįjams vyraujantis sukimo momentas padidėjo tik 1 Nm, o „C prekinio ženklo“ klįjams jis galima sakyti nepasikeitė.

Vizualinė bandinių patikra (žr. 3.10 pav. 4, 5, 6) neparodė jokių neįprastų rezultatų, klįjai buvo tolygiai pasiskirstę ant visų bandinių bei matomi ryškūs klįjų likučiai ant varžto sriegio.



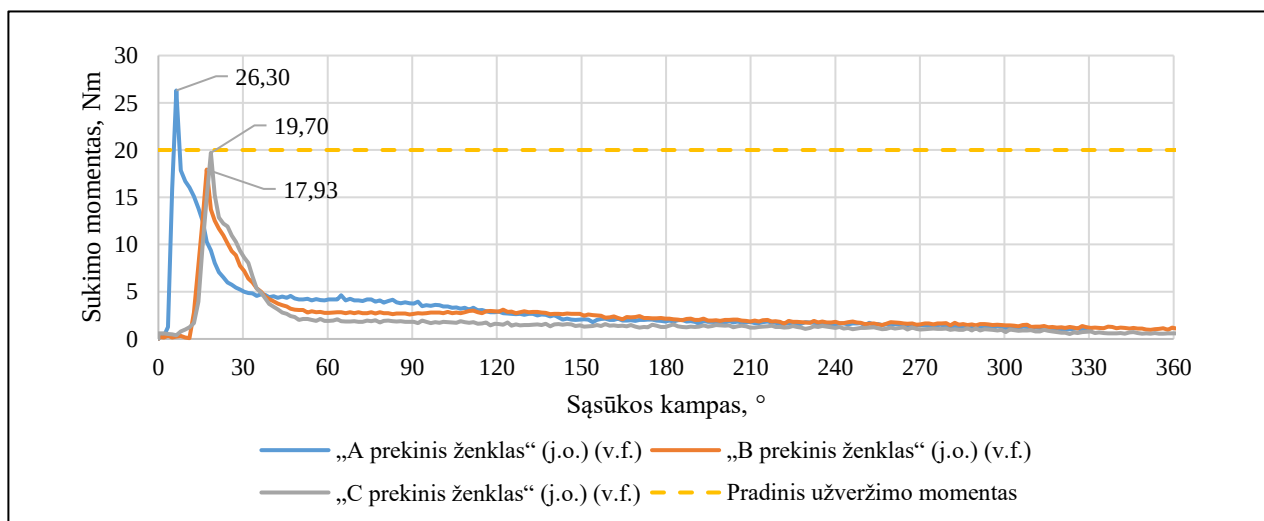
**3.10 pav.** Terminio poveikio tyrimo bandiniai po išardymo

Paveiksle vaizduojami srieginiai sujungimai su skirtingais fiksavimo kliais: 1- „A prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 2- „B prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 3- „C prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 4- „A prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 5- „B prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 6- „C prekinis ženklas (stipri fiksacija)“.

Toliau analizuojami gauti duomenys iš dinaminių smūginių apkrovų poveikio bandymo ir vertinama, kokią įtaką dinaminės apkrovos turi srieginių sujungimų fiksavimo klijų kokybinėms charakteristikoms.

### 3.3. Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo rezultatai

Trečiasis vykdytas tyrimas buvo susijęs su dinaminių smūginių apkrovų poveikiu anaerobiniams klijams. Dėl virpesių stendo techninių galimybių virpesių amplitudė buvo sumažinta iki 3 mm, kitaip, negu buvo aprašoma bandymo standarte. Šiame tyrime buvo naudojama po 3 skirtingo padengimo bandinius su skirtingų rūšių bei gamintojų klijais. Tyrimo metu bandinys buvo prasukamas 360 laipsnių. Aukščiausia užfiksuota sukimo momento vertė buvo vertinama kaip irimo sukimo momento vertė ir ji buvo lyginama su pradiniu užveržimo momentu, kuris buvo lygus 20 Nm, o likusių verčių aritmetinis vidurkis nuo didžiausio užfiksuoto momento iki 360 laipsnių ribos buvo fiksuojamas kaip vyraujantis irimo sukimo momentas. Šiuo tyrimu buvo siekiama išsiaiškinti, kokios yra anaerobinių klijų galimybės išlaikyti pradinį užveržimo momentą veikiant dinaminėms smūginėms apkrovoms.



**3.11 pav.** Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant vidutinės fiksacijos klijus su juodai oksiduotomis detalėmis

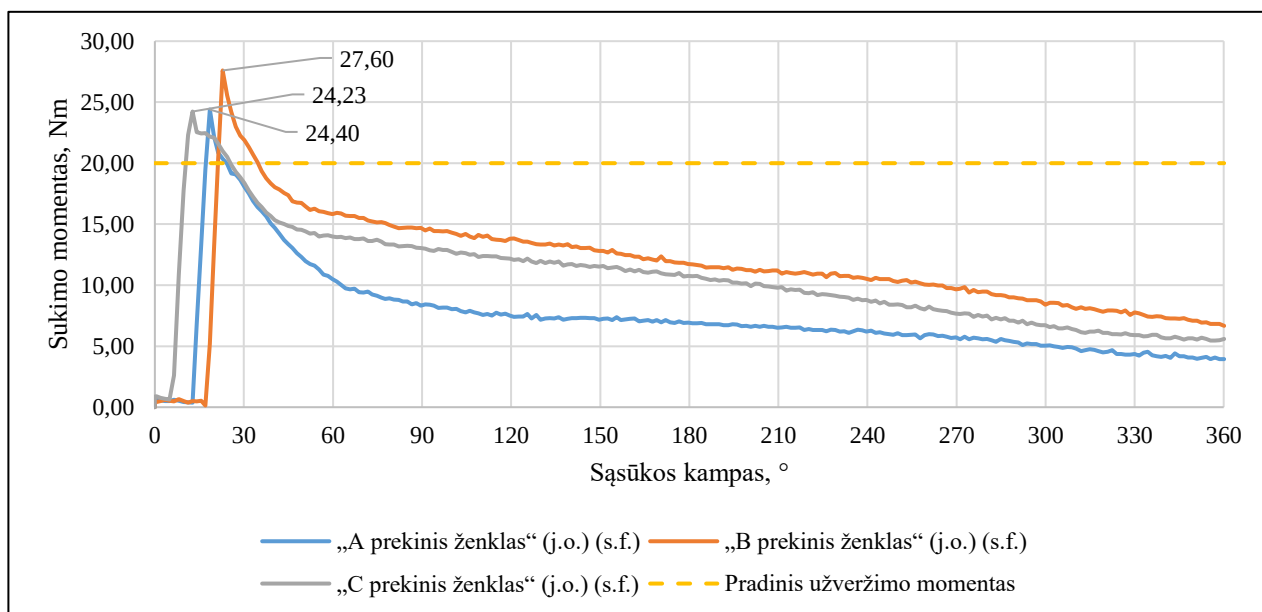
**3.9 lentelė.** Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klėjais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ | Pradinis užveržimo momentas | Atsukimo momentas bandinio be klijų |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 26,3                 | 17,93                | 19,7                 | 20                          | 10,85                               |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 2,77                 | 2,49                 | 1,80                 | -                           | -                                   |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,87                 | 1,10                 | 0,55                 | -                           | -                                   |

Pirmasis bandymas buvo atliekamas su juodo oksidavimo bandiniais su vidutinės fiksacijos klėjais. Vertinant irimo sukimo momento vertes (žr. 3.11 pav. ir 3.9 lentelė) pastebėta, kad vieninteliai „A prekinio ženklo“ klėjai sugebėjo ne tik išlaikyti pradinę junginio įvaržą, bet netgi padidinti reikalingą sukimo momentą junginio atveržimui – irimo sukimo momentas buvo lygus 26,3 Nm. Kitų gamintojų klėjai nesugebėjo išlaikyti sudarytos pradinės įvaržos, tačiau parodė pakankamai gerą rezultatą, lyginant su bandiniu be klijų – abiejų gamintojų klėjai sugebėjo išlaikyti apie 18-19 Nm pradinę įvaržą.

Vyraujančio sukimo momento rezultatų analizė parodė gana panašias vertes tarp skirtingų gamintojų klijų. Irimo sukimo momentas svyravo nuo 1,8 iki 2,7 Nm, kas paprastai tariant yra veržlės užsukimas ranka.

Vizualinė bandinių patikra patvirtino gautus bandymo rezultatus – didžiausias klijų likutis ir tolygiausias pasiskirstymas ant sriegio matomas su „A prekinio ženklo“ klėjais (žr. 3.15 pav. 3), o ant bandinių su „B prekinio ženklo“ ir „C prekinio ženklo“ matomi žymiai mažesni klijų likučiai (žr. 3.15 pav. 1 ir 4).



**3.12 pav.** Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant stiprios fiksacijos klėjus su juodai oksiduotomis detalėmis

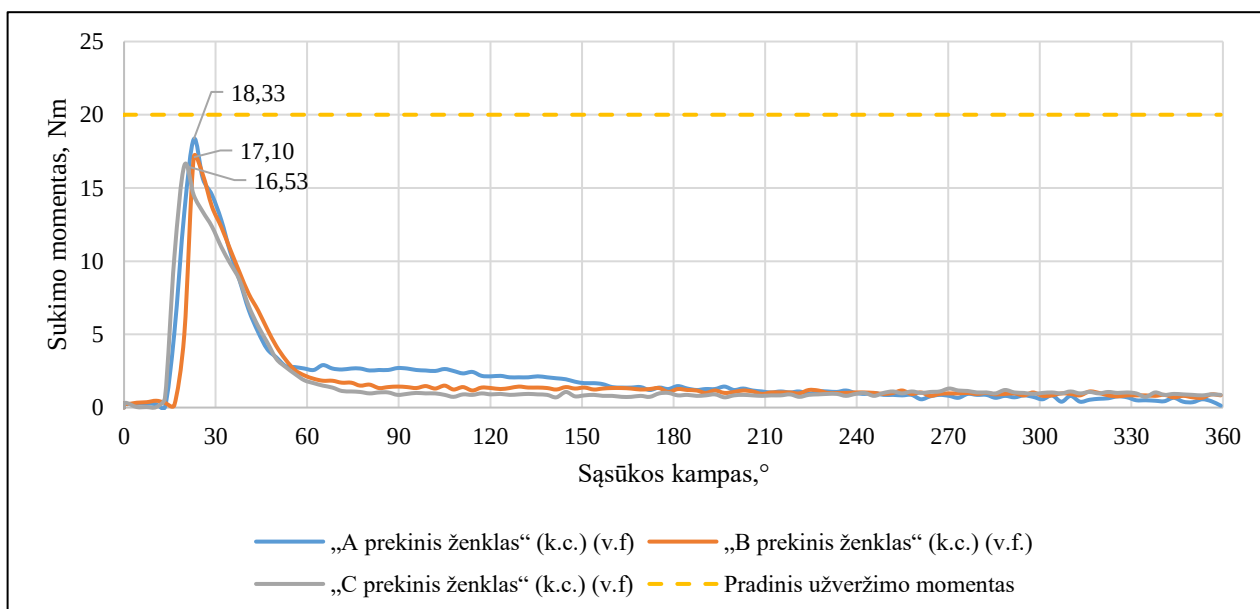
**3.10 lentelė.** Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su juodai oksiduotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klėjais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ | Pradinis užveržimo momentas | Atsukimo momentas bandinio be klijų |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 24,4                 | 27,6                 | 24,23                | 20                          | 10,85                               |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 7,55                 | 11,97                | 10,61                | -                           | -                                   |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,62                 | 1,04                 | 0,81                 | -                           | -                                   |

Kito bandymo rezultatai (žr. 3.12 pav. ir 3.10 lentelė) parodė žymiai geresnes stiprios fiksacijos klijų savybės išlaikyti suteiktą pradinę įvaržą, lyginant su vidutinės fiksacijos klėjais. Šiuo atveju didžiausias irimo sukimo momentas buvo gautas naudojant „B prekinio ženklo“ klėjus – sukimo momentas buvo lygus 27,6 Nm. Nors ir su kitų gamintojų klėjais buvo gautos mažesnės irimo sukimo momento vertės, tačiau jie taip pat sugebėjo išlaikyti pradinę įvaržą.

Bandymo metu gauti vyraujančio sukimo momento dydžiai buvo gauti tokie, kokių ir buvo tikėtasi, t.y. žymiai didesni už vidutinės fiksacijos klėjus. Čia skirtingų klijų gamintojų fiksavimo efektyvumas pasiskirstė tokia pačia tendencija kaip ir vertinant irimo sukimo momentą.

Vizualinė bandinių patikros rezultatai buvo tenkinami, buvo matomas tolygus klijų pasiskirstymas ant sriegių paviršių bei didelis kiekis klijų likučių ant varžto (žr. 3.15 pav. 2, 5 ir 6).



**3.13 pav.** Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant vidutinės fiksacijos klėjus su karštai cinkuotomis detalėmis

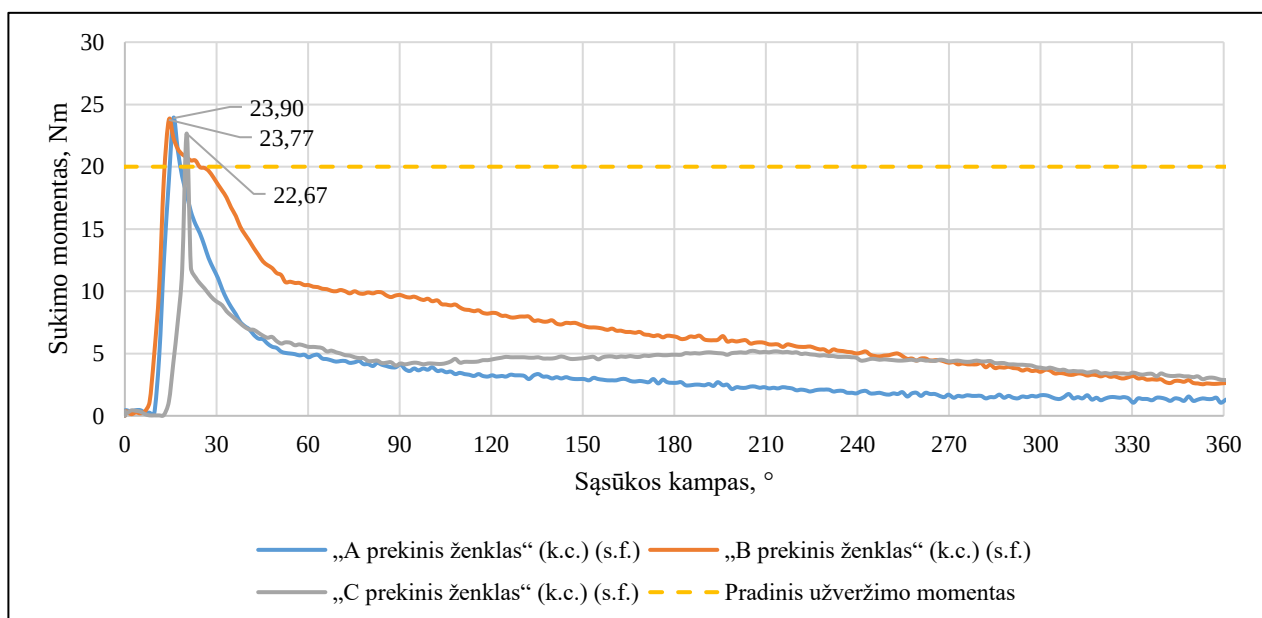
**3.11 lentelė.** Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir vidutinės fiksacijos klėjais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ | Pradinis užveržimo momentas | Atsukimo momentas bandinio be klijų |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 18,33                | 17,10                | 16,53                | 20                          | 10,1                                |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 2,03                 | 1,87                 | 1,71                 | -                           | -                                   |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 1,11                 | 0,65                 | 0,77                 | -                           | -                                   |

Vertinant karštai cinkuotus bandinius su vidutinės fiksacijos klėjais (žr. 3.13 pav. ir 3.11 lentelė) buvo matomi sumažėję rezultatai, lyginant su juodo oksidavimo bandiniais. Toks rezultatas buvo tikimasis dėl mažesnio cinko reaktyvumo su anaerobiniais klėjais. Tačiau gautų rezultatų tendencija išliko tokia pati kaip ir su juodo oksidavimo bandiniais: didžiausias irimo sukimo momentas fiksuotas su „A prekinio ženklo“ klėjais (18,33 Nm), o su kitų gamintojų klėjais sukimo momentas buvo jau kiek mažesnis (su „B prekinio ženklo“ 17,1 Nm, o su „C prekinio ženklo“ 16,53 Nm).

Vyraujantis sukimo momentas visų gamintojų klėjams buvo fiksuojamas labai mažas ir jo vertės pasiskirstė tokia pačia tvarka kaip ir pagal irimo sukimo momento vertes.

Vykdam vizualinę bandinių patikrą (žr. 3.16 pav. 1, 3, 4) buvo pastebėtas labas mažas klijų likučių kiekis ant „C prekinio ženklo“ klijų bandinio (didžioji dalis likučių nutrūpėjo išardymo metu), didesnė dalis likučių yra matoma ant bandinių su „A prekinio ženklo“ ir „B prekinio ženklo“ klėjais.



**3.14 pav.** Pradinio užveržimo momento priklausomybė nuo dinaminių apkrovų, naudojant stiprios fiksacijos klėjus su karštai cinkuotomis detalėmis

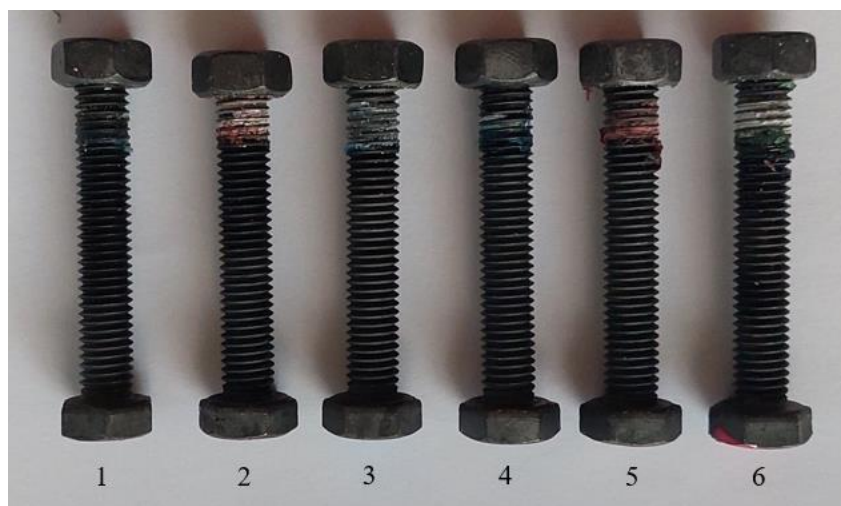
**3.12 lentelė.** Dinaminių smūginių apkrovų poveikio tyrimo rezultatai su karštai cinkuotomis detalėmis ir stiprios fiksacijos klėjais

|                                                     | „A prekinis ženklas“ | „B prekinis ženklas“ | „C prekinis ženklas“ | Pradinis užveržimo momentas | Atsukimo momentas bandinio be klijų |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Irimo sukimo momentas                               | 23,90                | 23,77                | 22,67                | 20                          | 10,1                                |
| Vyraujantis sukimo momentas                         | 3,35                 | 7,23                 | 4,75                 | -                           | -                                   |
| Irimo sukimo momento duomenų standartinis nuokrypis | 0,71                 | 0,91                 | 0,66                 | -                           | -                                   |

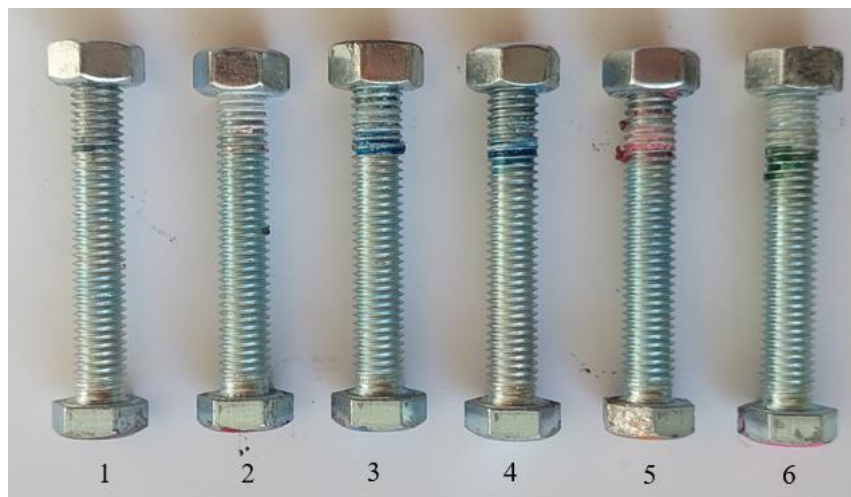
Atlikus bandymus su karštai cinkuotais bandiniais su stiprios fiksacijos klėjais (žr. 3.14 pav. ir 3.12 lentelė) buvo pastebėtas vienas skirtumas, lyginant su juodo oksidavimo bandiniais. Šiuo atveju didesnis irimo sukimo momentas buvo užfiksuotas su „A prekinio ženklo“ klėjais – jis buvo lygus 23,9 Nm.

Vyraujančio sukimo momento vertinimas parodė panašią rezultatų tendenciją kaip ir bandymas su juodai oksiduotais bandiniais. Didžiausia vertė buvo gauta su „B prekinio ženklo“ klėjais (nuo juodai oksiduoto skyrėsi 4,74 Nm), sekantis didžiausias vyraujantis sukimo momentas buvo su „C prekinio ženklo“ klėjais (skirtumas 5,89 Nm), o mažiausias vyraujantis sukimo momentas buvo gautas su „A prekinio ženklo“ klėjais (skirtumas 4,2 Nm).

Vizualinė patikra parodė (žr. 3.16 pav. 2, 5, 6) netolygų klijų pasiskirstymą ant „C prekinio ženklo“ bandinio, o su likusiais klėjais klijų pasiskirstymas ant sriegio paviršius buvo tolygus ir buvo matomas gana didelis klijų likučių kiekis.



**3.15 pav.** Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo juodai oksiduoti bandiniai po išardymo



**3.16 pav.** Dinaminių smūginių apkrovų tyrimo karštai cinkuoti bandiniai po išardymo

Paveiksle vaizduojami srieginiai sujungimai su skirtingais fiksavimo kliais: 1- „C prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 2- „C prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 3- „A prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 4- „B prekinis ženklas (vidutinė fiksacija)“; 5- „A prekinis ženklas (stipri fiksacija)“; 6- „B prekinis ženklas (stipri fiksacija)“.

### 3.4. Tyrimų rezultatų aptarimas, diskusija

Atlikti tyrimai leido plačiai susipažinti su anaerobinių klijų savybėmis bei pritaikomumą naudoti skirtingomis darbo ir aplinkos sąlygomis. Vieni klijų prekiniai ženklai pasižymėjo geresnėmis ir didesnėmis irimo sukimo momento vertėmis, kiti parodė aukštesnius vyraujančio sukimo momento rodiklius, todėl yra svarbu yra įsivertinti, kurio prekinio ženklo klijai geriausiai atitiktų gamintojų deklaruojamas specifikacijas bei kurie pasižymi geriausiu kainos ir kokybės santykiu.

Vertinant vidutinės fiksacijos klijus pagal palyginamąsias irimo sukimo momento vertes, galima teigti, kad geriausiai keliamus kriterijus atitiko „A prekinio ženklo“ klijai. Šio gamintojo produktas parodė ne tik geriausiai gamintojo specifikacijas atitinkančius irimo sukimo momento dydžius, tačiau ir šių klijų vyraujantis sukimo momentas užtikrintų patikimą apsaugą nuo savaiminio junginio atsileidimo jau perkopus irimo sukimo momento tašką. Vertinant iš finansinės pusės, šie klijai puikiai atitinka kainos ir kokybės santykį, kadangi iš lygintų gamintojų klijų šie yra patys pigiausi. Siekiant naudoti geriausios kokybės stiprios fiksacijos klijus statinėmis sąlygomis rekomenduojama būtų naudoti „B prekinio ženklo“ klijus. Žinoma, šiuo atveju vienareikšmiško atsakymo negalėtų būti, kadangi šių klijų kaina yra didžiausia iš visų vertinamų ir čia yra jau pačio kliento pasirinkimas, ar jam rinktis tokius klijus ar ne, tačiau vertinant vien tik iš parametrinės pusės šie klijai būtų labiausiai rekomenduojami.

Tyrimų metu nustatyta kad, terminis poveikis taip pat gali daryti gana didelę įtaką tinkamų anaerobinių klijų pasirinkimui. Tiek ir „A prekinio ženklo“, ir „B prekinio ženklo“ gamintojų produktai parodė geras ir panašias vienas kitam kokybines charakteristikas. Šie klijai netgi pasiekia didesnes irimo ir vyraujančio sukimo momentų reikšmes suteikęs jiems terminį poveikį, todėl siekiant kuo stipresnio junginio stiprio trumpalaikis terminis apdorojimas tokiems junginiams netgi

būtų rekomenduotinas. Finansiškai, žinoma, tarp šių klijų išryškėja labai didelis skirtumas, todėl siekiant tinkamo kokybės ir kainos santykio rekomenduojama būtų naudoti „A prekinio ženklo“ gamintojo produktus.

Galiausiai, didžioji dalis srieginių sujungimų įrenginiuose yra veikiami įvairių dinaminių apkrovų, todėl svarbu ir naudinga yra išsiaiškinti geriausiai kliento poreikius tenkinantį produktą. Geriausias irimo sukimo momento vertes daugeliu atveju (naudojant skirtingus padengimus ir skirtingas klijų rūšis) parodė „A prekinio ženklo“ gamintojo produktai. Vis dėlto, verta paminėti tai, kad „B prekinio ženklo“ gamintojo produktai parodė žymiai geresnius vyraujančio sukimo momento rezultatus, todėl renkantis tinkamą produktą reikėtų įsivertinti jo naudojimo sąlygas: jeigu srieginis junginys yra naudojamas palaikyti reikiamą pradinę įvaržą tarp detalių, tuomet rekomenduojama naudoti „A prekinio ženklo“ gamintojo produktus dėl didesnių irimo sukimo momento verčių; jeigu srieginis junginys naudojamas tik kaip laikančioji konstrukcija (pavyzdžiui, kaištis), patartina naudoti „B prekinio ženklo“ gamintojo produktus, vertinant didesnes vyraujančio sukimo momento vertes, kurios neleistų lengvai nusiūkti veržlei nuo varžto.

Vertinant gautus tyrimų rezultatus nerekomenduojama naudoti „C prekinio ženklo“ gamintojo klijus, nes jie nei pasižymi patikimomis stiprumo savybėmis, nei finansiniu požiūriu yra patrauklūs ar naudingi.

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad vertinant anaerobinius srieginių sujungimų klijus, svarbiausia yra nusistatyti kokiomis apkrovomis bus veikiamas srieginis sujungimas ir kokie aplinkos veiksniai galimai darys įtaką jo patikimumui. Žinant atsakymus į šiuos klausimus belieka tik kliento pasirinkimas – ar jis teikia pirmenybę kokybei ar kainai.

## Išvados ir rekomendacijos

1. Analizuojant literatūros ir informacijos šaltinius buvo nustatyta, kad yra išskiriamos dvi srieginių sujungimų atsileidimų rūšys – rotacinis ir ne rotacinis atsileidimas. Rotaciniam atsileidimui slopinti praktikoje dažniausiai yra naudojama 10 mechaninės apsaugos priemonių: karūnuotosios veržlės, veržlės su nailoniniu žiedu, dvigubos veržlės, vienkryptės veržlės, veržlės su metalinėmis plokštelėmis, spyruoklinės poveržlės, fiksuojančios poveržlės, pleišto užraktai, varžtai ar veržlės su dantyta jungė ir „Heli-Coil įdėklai“. Remiantis atliktų tyrimų analize nustatyta, kad daug efektyvesnis ir naudingesnis srieginių sujungimų fiksavimo būdas nei mechaninės apsaugos priemonės yra anaerobinių klijų naudojimas.
2. Remiantis analizuotų tyrimų metodikomis ir rezultatais buvo nuspręsta atlikti tris bandymus su Lietuvos rinkai siūlomais produktais: irimo sukimo momento patikrinimo bandymą, terminio poveikio klijams bandymą ir dinaminių smūginių apkrovų poveikio klijams bandymą. Pirmiems dviem tyrimams buvo naudojamos M10 dydžio tvirtinimo detalės su karšto cinkavimo ir juodo oksidavimo padengimu. Dinaminių smūginių apkrovų bandymą buvo nuspręsta atlikti remiantis NASM 1312-7 standarto metodologija. Dėl techninių charakteristikų, šiame tyrime buvo nuspręsta naudoti M8 dydžio tvirtinimo detales su karšto cinkavimo ir juodo oksidavimo padengimu. Šiam tyrimui taip pat buvo suprojektuotas išardomas bandymo stendas pagal minėto standarto rekomendacijas.
3. Kiekvienam bandymui buvo sudarytos tyrimo metodologijos ir vykdymo sekos. Pirmajame bandyme buvo tikrinamas skirtingų gamintojų klijų irimo sukimo momentas ir lyginamas su gamintojo deklaruojamomis vertėmis. Antrajame bandyme buvo tiriamos klijų savybės paveikus juos maksimalia leistina darbine temperatūra 5 minutes ir leidus jiems vėl pinai sukietėti. Trečiajame bandyme buvo tiriamas klijų atsparumas dinaminėms smūginėms apkrovoms. Bandiniams su klijais buvo suteikta pradinė 20 Nm įvarža ir leidus klijams pilnai sukietėti jie buvo veikiami 30 Hz dažnio, 3 mm amplitudės smūginiais virpesiais 200 000 ciklų.
4. Pagal gautus atliktų tyrimų rezultatus buvo sudarytos rekomendacijos klijų naudojimui:
  - srieginių sujungimų neveikiant jokios išorinės apkrovoms geriausias fiksavimo savybes parodė „A prekinio ženklo“ vidutinės fiksacijos ir „B prekinio ženklo“ stiprios fiksacijos klijai;
  - antrojo bandymo metu buvo išsiaiškinta, kad trumpalaikis aukštos temperatūros poveikis gerina srieginių sujungimų fiksavimo klijų charakteristikas. Pagal kainos ir kokybės santykį rekomenduojama naudoti „A prekinio ženklo“ gamintojo klijus;
  - srieginius sujungimus veikiant dinaminėms smūginėms apkrovoms rekomenduojama naudoti tiek „A prekinio ženklo“, tiek ir „B prekinio ženklo“ gamintojų klijus. Pirmojo gamintojo klijai rodo geresnes charakteristikas vertinant pagal irimo sukimo momento vertes, o antrojo gamintojo klijai parodė žymiai didesnes vyraujančio sukimo momente reikšmes.

Trečiojo tirtą gamintojo klijų – „C prekinio ženklo“ nerekomenduojama naudoti dėl žemų stiprumo ir atsparumo savybių bei dėl gana didelės pardavimo kainos.

## Informacijos ir literatūros šaltinių sąrašas

1. Traukinio avarijos Grayrigg miestelyje tyrimo ataskaita. [interaktyvus] [žiūrėta 2024-02-26]. Prieiga per: [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a758fa940f0b6397f35f5d5/IR22007\\_071003\\_Grayrigg.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a758fa940f0b6397f35f5d5/IR22007_071003_Grayrigg.pdf)
2. Lėktuvo gaisro Nahos oro uoste tyrimo ataskaita. [interaktyvus] [žiūrėta 2024-02-26]. Prieiga per: [https://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-air\\_report/B18616.pdf](https://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-air_report/B18616.pdf)
3. Atrakcionų parko avarija Šendžene, Kinijoje. [interaktyvus] [žiūrėta 2024-02-26]. Prieiga per: <https://www.wsj.com/articles/BL-CJB-9442>
4. Porsche 911 GT3 automobilių atšaukimas. [interaktyvus] [žiūrėta 2024-02-26]. Prieiga per: <https://boltfailure.com/fastener-failures-prove-surprisingly-common-in-the-automotive-industry>
5. DULEVIČIUS, J., EIDUKYNAS, V., PILKAUSKAS, K., ir kt. *Mašinų elementai: skaičiavimas ir konstravimas*. Kaunas: Technologija, 2006, p.135.
6. ECCLES, Bill. Self Loosening of threaded fasteners. *Fastner + Fixing Technology*. 2011, 2, p. 22-23. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-05]. Prieiga per: <https://www.boltscience.com/pages/self-loosening-of-threaded-fasteners.pdf>
7. Ne rotacinio pobūdžio sujungimų atsileidimų priežastys. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-05]. Prieiga per: <https://www.boltscience.com/pages/non-rotational-loosening-introduction.htm>
8. GONG, H., DING, X., Liu, J., FENG, H. Review of reaserch on loosening of threaded fasteners. *Friction*. 2022, 10, 335-359. ISSN 2223-7690.
9. BICKFORD, John H. *Introduction to the Design and Behaviour of Bolted Joints. Fourth Eition. Non-Gasketed Joints*. Boca Ratonas: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-8176-8
10. WOO, Chulsoo. *Liquid Thread Locking Solution for Machinery Assembly Industry*. IntechOpen. 2019. p.2
11. VOKIETIJOS STANDARTIZACIJOS INSTITUTAS [DIN 946]. Varžtų/veržlių sujungimų trinties koeficiento nustatymas nurodytomis sąlygomis. (ISO 16047) = Determination of coefficient of friction of bolt/nut assemblies under specified conditions. 1991.
12. Proper Use of Fiber or Nylon Self-Locking nuts [interaktyvus]. 2015 [Žiūrėta 2024-03-08]. Prieiga per: <https://www.nts.gov/Advocacy/safety-alerts/Documents/SA-028.pdf>
13. ECCLES, Bill. The use of two nuts to prevent self losening. *Fastner + Fixing Magazine*. [interaktyvus]. Hertfordshire, 2008, vol. 54, p. 106-107. [Žiūrėta 2024-03-08]. Prieiga per: [https://issuu.com/fastenerfixingmagazines/docs/ffm\\_issue\\_54](https://issuu.com/fastenerfixingmagazines/docs/ffm_issue_54)
14. CONDRON, David. *Advances in Anaerobic Adhesives*. Woodhead Publishing. 2023. p. 159. ISBN 9780323912143
15. „Loctite Henkel“ įmonės srieginių sujungimų klijų savybės [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-08]. Prieiga per: [https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/MRO\\_TL\\_Guide](https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/MRO_TL_Guide)
16. IRELAND, A.J., SHERRIFF, M. The influence of alloy copper content on the polymerisation of anaerobic adhesives. *Journal of Dentistry*. 1999, 27, 155-161.
17. FEENEY, M., NEUMAYER, R. ir kt. *How to increase reliability and prevent threaded assembly failure*. Henkel Cooperation. 2020. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/LOCTITE-Threadlocker-Manual>

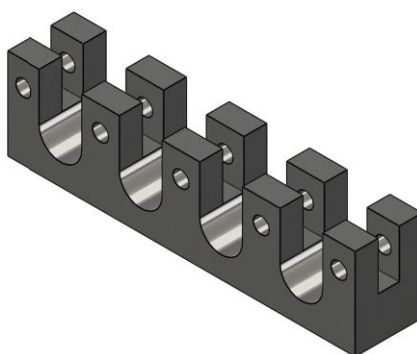
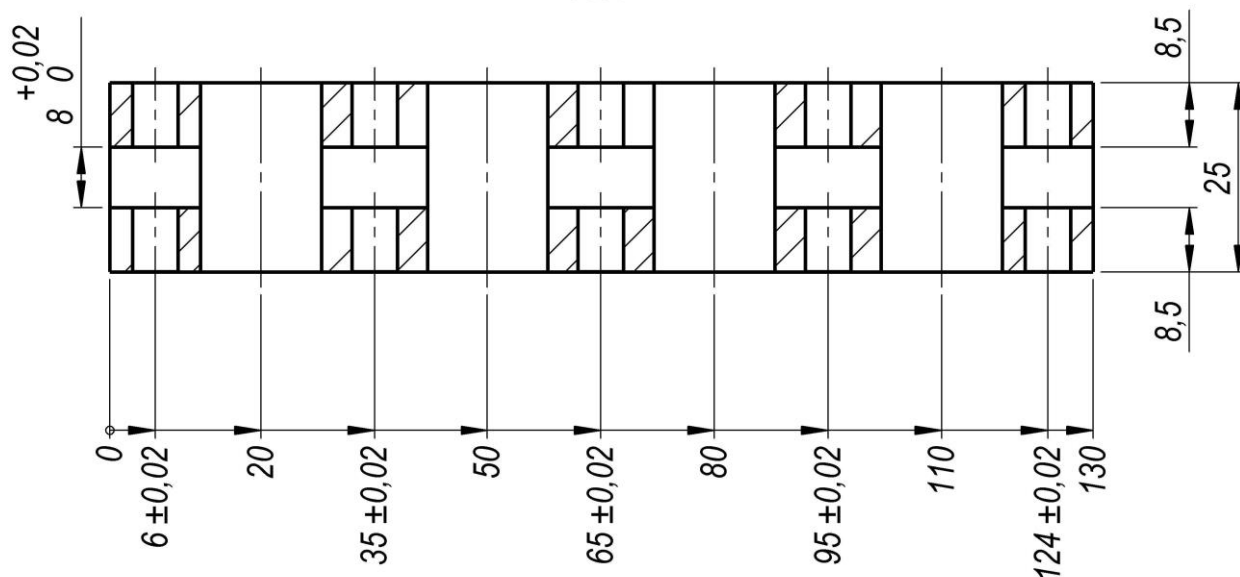
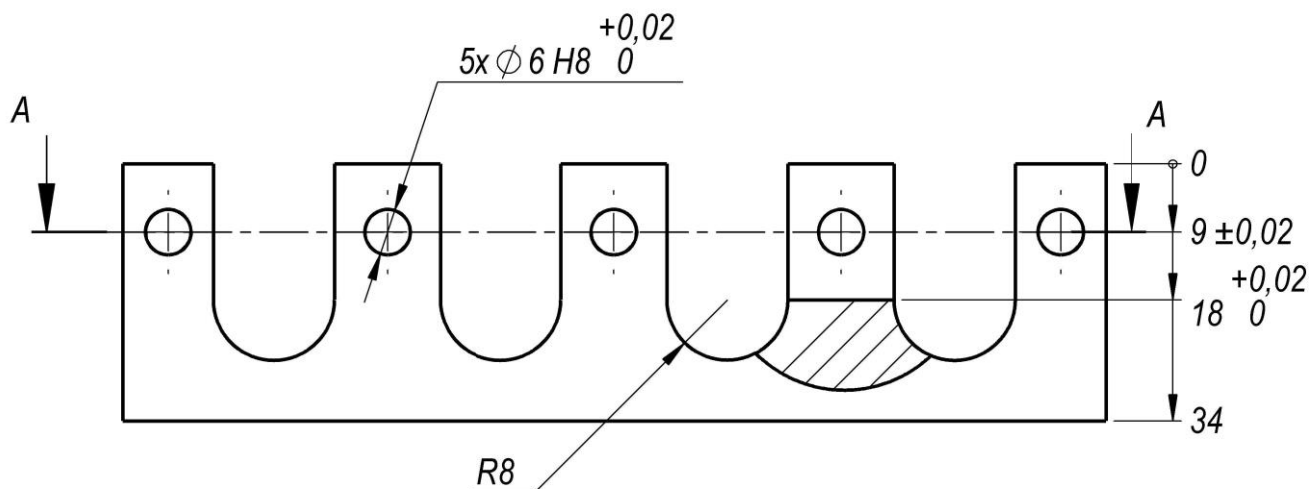
18. BLOCH, H.P., GEITNER, F.K. *Machinery Component Maintenance and Repair. Fourth Edition.* Gulf Professional Publishing. 2019, p. 490. ISBN 9780128187296
19. JUNKER, Gerhard H. New criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration. SAE international. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-09] 1969, p. 22. ISSN 0148-7191. Prieiga per: <https://doi.org/10.4271/690055>
20. TARPTAUTINĖ STANDARTIZAVIMO ORGANIZACIJA [ISO 16130:2015]. Varžtinių sujungimų fiksavimo dinaminis testavimas veikiant skersinei apkrovai (vibracijų testas) = Dynamic testing of the locking behaviour of bolted connections under transverse loading conditions (vibration test). 2021. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://www.iso.org/standard/55728.html>
21. NASM 1312-7 standarto metodologijos aprašas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <http://integra.cimav.edu.mx/intranet/data/files/calidad/documentos/nadcap/NASM1312-7%20VIBRATION.pdf>
22. SAWA, T., ISHIMURA, M., YAMANAKA, H. Experimental Evaluation of Screw Thread Loosening in Bolted Joint With Some Parts for Preventing the Loosening Under Transverse Repeated Loadings. 2006. DOI:10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93292.
23. Testavimo metodologijų palyginimas. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: [https://vibrationmaster.com/wp-content/uploads/2017/09/Testing\\_fasteners\\_for\\_OEM\\_certification.pdf](https://vibrationmaster.com/wp-content/uploads/2017/09/Testing_fasteners_for_OEM_certification.pdf)
24. CROCCOLO, D., AGOSTINIS, M., FINI, S., OLMI G. An experimental study on the response of threadlocker, involving materials, screw dimensions and thread proportioning. *International Journal Of Adhesion and Adhesives*. 2018, 83, 116-122.
25. CROCCOLO, D., AGOSTINIS, M., FINI, S., OLMI G., PAIARDINI, L., ROBUSTO, F. Effects of aging temperature and humidity on the response of medium and high strength threadlockers. *The Journal of Adhesion*. 2022, 98, 721-738
26. WANG, G., LIU, X., BAI, X., ir kt. Effects of borosiloxane oligomer on the properties of anaerobic adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017, 78, 167-173.
27. CROCCOLO, D., AGOSTINIS, M., FINI, S., OLMI G., PAIARDINI, L., ROBUSTO, F. Threaded fasteners with applied medium and high strength threadlockers: effect of different tightening procedures on tribological response. *The Journal of Adhesion*. 2020, 96, 64-89.
28. CHEATHAM, C.A., ACOSTA, C.F., HESS, D.P. Tests and analysis of secondary locking features in threaded inserts. *Engineering Failure Analysis*. 2009, 16, 39-57.
29. „Heli-Coil“ įdėklai. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://www.boellhoff.com/at-en/products/special-fasteners/helicoil-thread-inserts-for-metals/#c1562>
30. Vieno iš prekinių ženklų klijų kaina Lietuvos rinkoje. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://www.stokker.lt/>
31. Vieno iš prekinių ženklų klijų kaina Lietuvos rinkoje. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://www.drutsraigtis.lt/>
32. Vieno iš prekinių ženklų klijų kaina Lietuvos rinkoje. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-03-09]. Prieiga per: <https://www.eoltas.lt/lt-lt>
33. Riebalų valiklis „Würth“. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-02]. Prieiga per: [https://www.wurth.lt/product/riebalu-valiklis-bremsenreiniger-41/0890\\_108\\_7](https://www.wurth.lt/product/riebalu-valiklis-bremsenreiniger-41/0890_108_7)

34. Sukimo momento testavimo mašinos „Gunt WP 510“ techniniai parametrai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-02]. Prieiga per: <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/materials-testing/torsional-test/torsion-test-200nm-motor-drive/020.51000/wp510/glct-1:pa-148:ca-36:pr-1648>
35. Virpesių žadintuvo „Tira TV“ techniniai parametrai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-02]. Prieiga per: [https://www.tiragmbh.de/fileadmin/inhalte/download/schwingprueftechnik/schwingpruefanlagen/standard/EN/1000N\\_bis\\_2700N/data\\_sheet\\_system\\_tv\\_54216-130\\_eng\\_V04.pdf](https://www.tiragmbh.de/fileadmin/inhalte/download/schwingprueftechnik/schwingpruefanlagen/standard/EN/1000N_bis_2700N/data_sheet_system_tv_54216-130_eng_V04.pdf)
36. Dinamometrinio rakto „Wera“ techniniai parametrai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-02]. Prieiga per: [https://products.wera.de/en/torque\\_tools\\_series\\_click-torque\\_wrenches\\_click-torque\\_adjustable\\_torque\\_wrenches\\_for\\_insert\\_tools\\_click-torque\\_x\\_1.html](https://products.wera.de/en/torque_tools_series_click-torque_wrenches_click-torque_adjustable_torque_wrenches_for_insert_tools_click-torque_x_1.html)
37. Temperatūrinės kameros „Snol“ techniniai parametrai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-02]. Prieiga per: <https://snol.com/lt/product/snol-58-350-lsn11/>

## **Priedai**

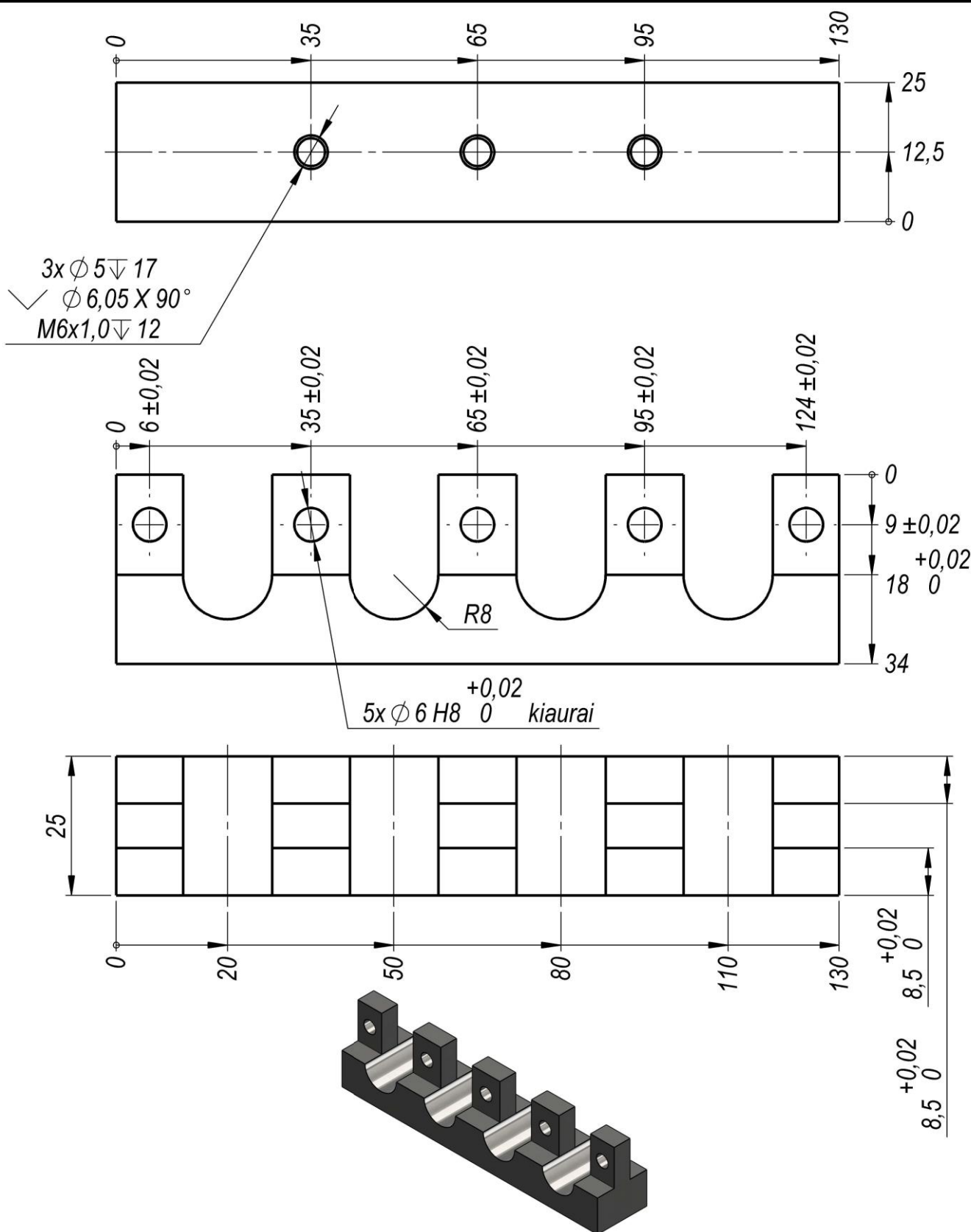
Priedų sąrašas:

1. Priedas. Viršutinės korpuso dalies brėžinys (61 psl.);
2. Priedas. Apatinės korpuso dalies brėžinys (62 psl.);
3. Priedas. Įvorės brėžinys (63 psl.);
4. Priedas. Žiedo brėžinys (64 psl.);
5. Priedas. Tvirtinimo plokštės brėžinys (65 psl.);
6. Priedas. Testavimo stendo surinkimo brėžinys (66 psl.);
7. Priedas. Testavimo stendo detalių sąrašas (67 psl.).



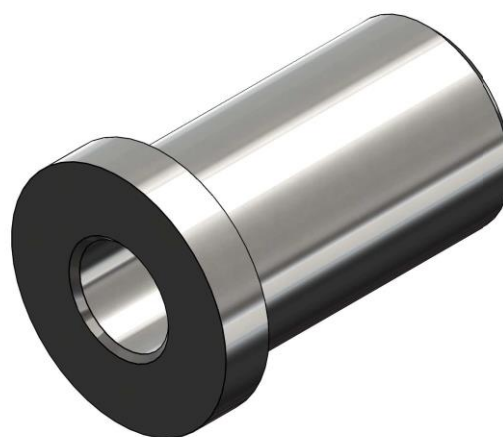
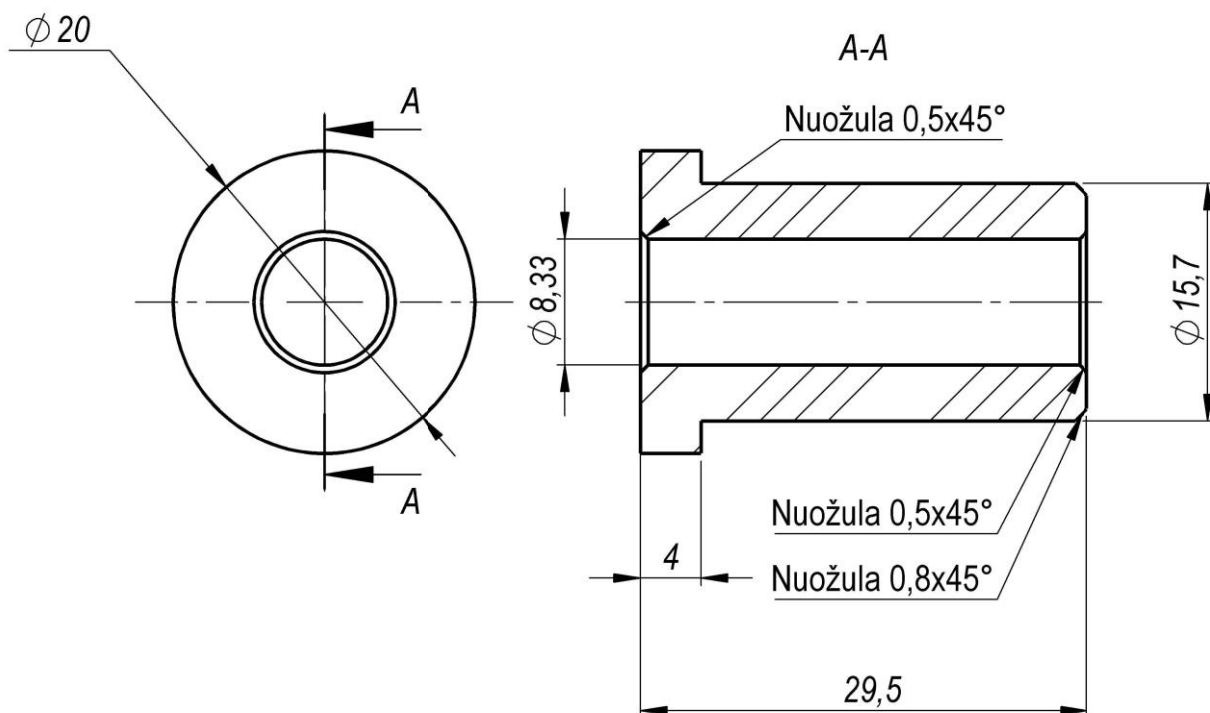
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

|                          |                               |                                     |                                          |                                                    |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                          | Byla, laikmena                | Papildoma informacija               | Medžiaga<br>Konstrukcinis plienas S275J0 | Mastelis<br>M 1:1                                  |
| Atsakinga žinyba         | Vadovas                       | Dokumento tipas<br>Detalės brėžinys | Dokumento statusas<br>Mokomasis          |                                                    |
| Savininkas<br><b>KTU</b> | Rengė<br>Kasparas Vilkevičius | Antraštė<br>Viršutinė korpuso dalis | Žymuo<br>MBP.00.00.001                   |                                                    |
|                          | Tvirtino<br>Darius Eidukynas  |                                     | Laida<br>A                               | Data<br>2024-02-19<br>Kalba<br>lt.<br>Lapas<br>1/1 |



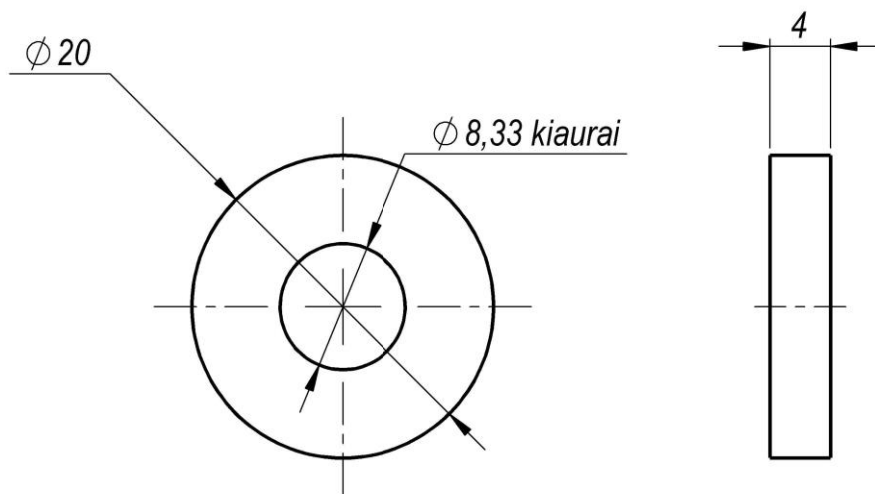
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

|                       |                               |                                     |                                          |                    |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
|                       | Byla, laikmena                | Papildoma informacija               | Medžiaga<br>Konstrukcinis plienas S275J0 | Mastelis<br>M 1:1  |
| Atsakinga žinyba      | Vadovas                       | Dokumento tipas<br>Detalės brėžinys | Dokumento statusas<br>Mokomasis          |                    |
| Savininkas<br><br>KTU | Rengė<br>Kasparas Vilkevičius | Antraštė<br>Apatinė korpuso dalis   | Žymuo<br>MBP.00.00.002                   |                    |
|                       | Tvirtino<br>Darius Eidukynas  |                                     | Laida<br>A                               | Data<br>2024-02-19 |



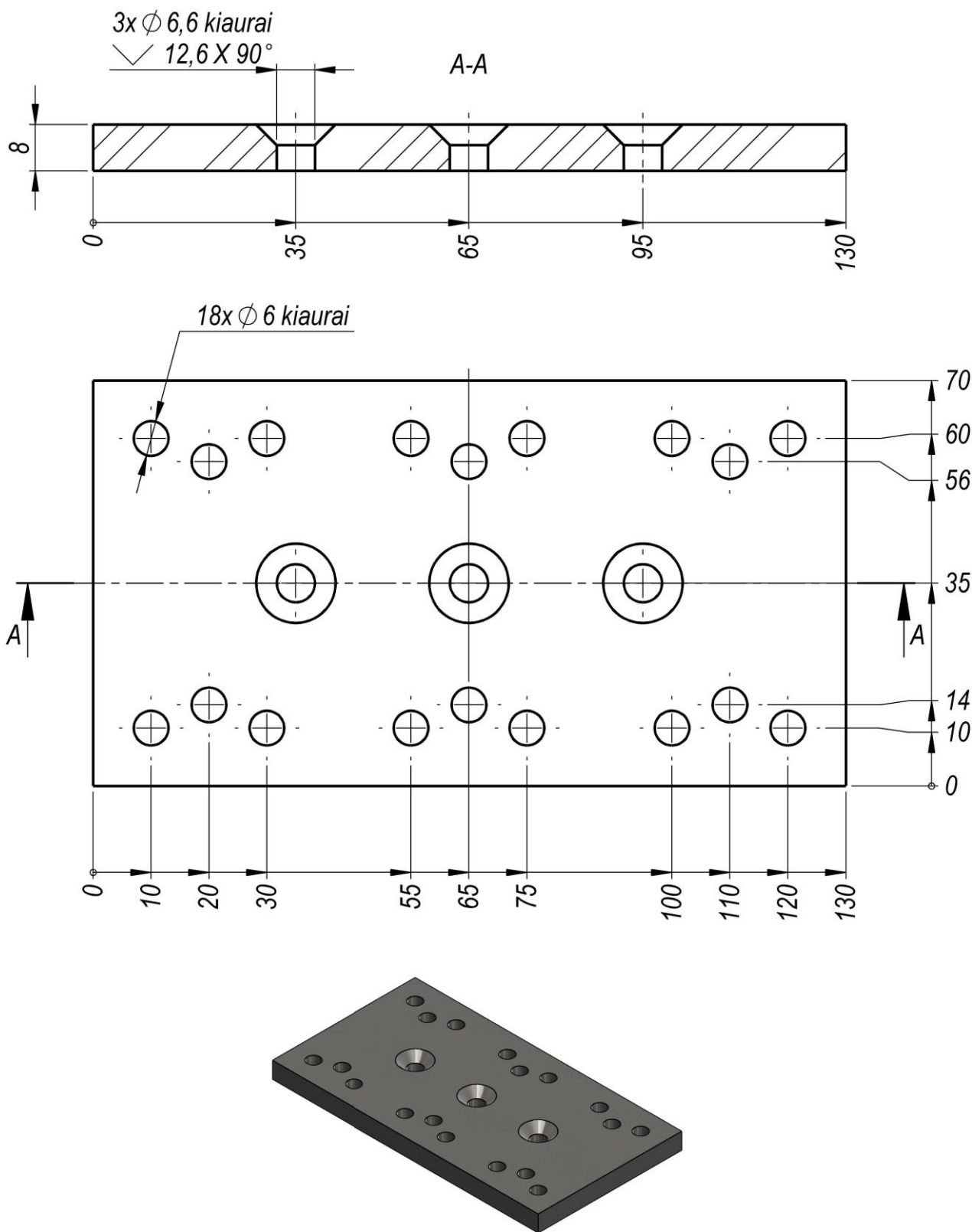
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

|                          |                               |                                     |                                          |                                                    |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                          | Byla, laikmena                | Papildoma informacija               | Medžiaga<br>Konstrukcinis plienas S275J0 | Mastelis<br>M 2:1                                  |
| Atsakinga žinyba         | Vadovas                       | Dokumento tipas<br>Detalės brėžinys | Dokumento statusas<br>Mokomasis          |                                                    |
| Savininkas<br><b>KTU</b> | Rengė<br>Kasparas Vilkevičius | Antraštė<br>Ivorė                   | Žymuo<br>MBP.00.00.003                   |                                                    |
|                          | Tvirtino<br>Darius Eidukynas  |                                     | Laida<br>A                               | Data<br>2024-02-19<br>Kalba<br>lt.<br>Lapas<br>1/1 |



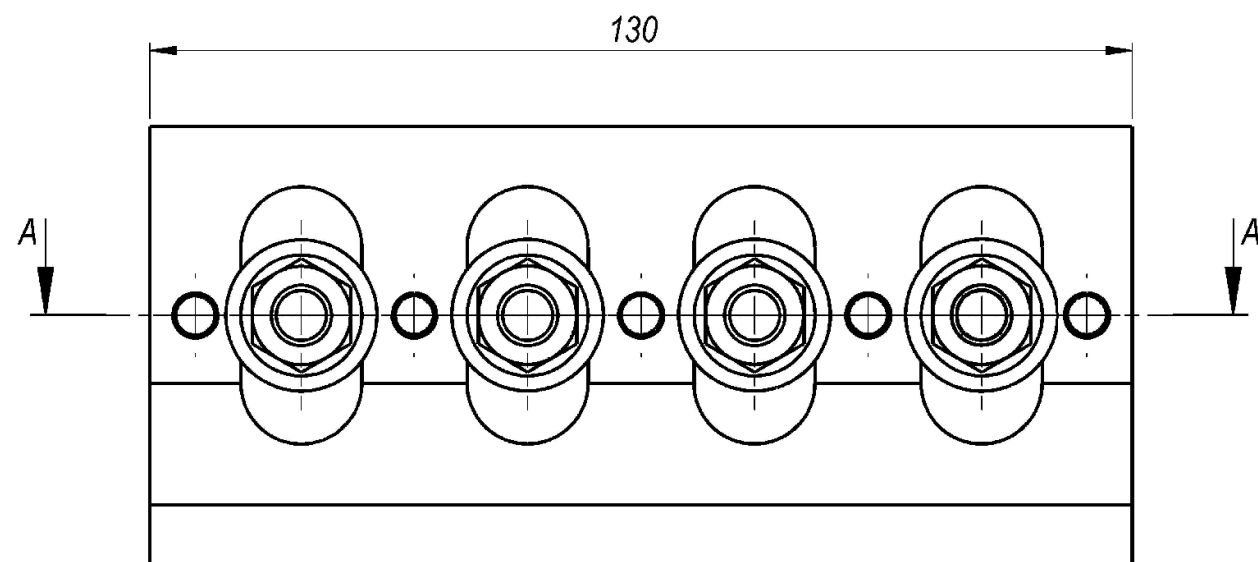
1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

|                          |                               |                                     |                                          |                                                    |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                          | Byla, laikmena                | Papildoma informacija               | Medžiaga<br>Konstrukcinis plienas S275J0 | Mastelis<br>M 2:1                                  |
| Atsakinga žinyba         | Vadovas                       | Dokumento tipas<br>Detalės brėžinys | Dokumento statusas<br>Mokomasis          |                                                    |
| Savininkas<br><b>KTU</b> | Rengė<br>Kasparas Vilkevičius | Antraštė<br><b>Žiedas</b>           | Žymuo<br><b>MBP.00.00.004</b>            |                                                    |
|                          | Tvirtino<br>Darius Eidukynas  |                                     | Laida<br>A                               | Data<br>2024-02-19<br>Kalba<br>lt.<br>Lapas<br>1/1 |

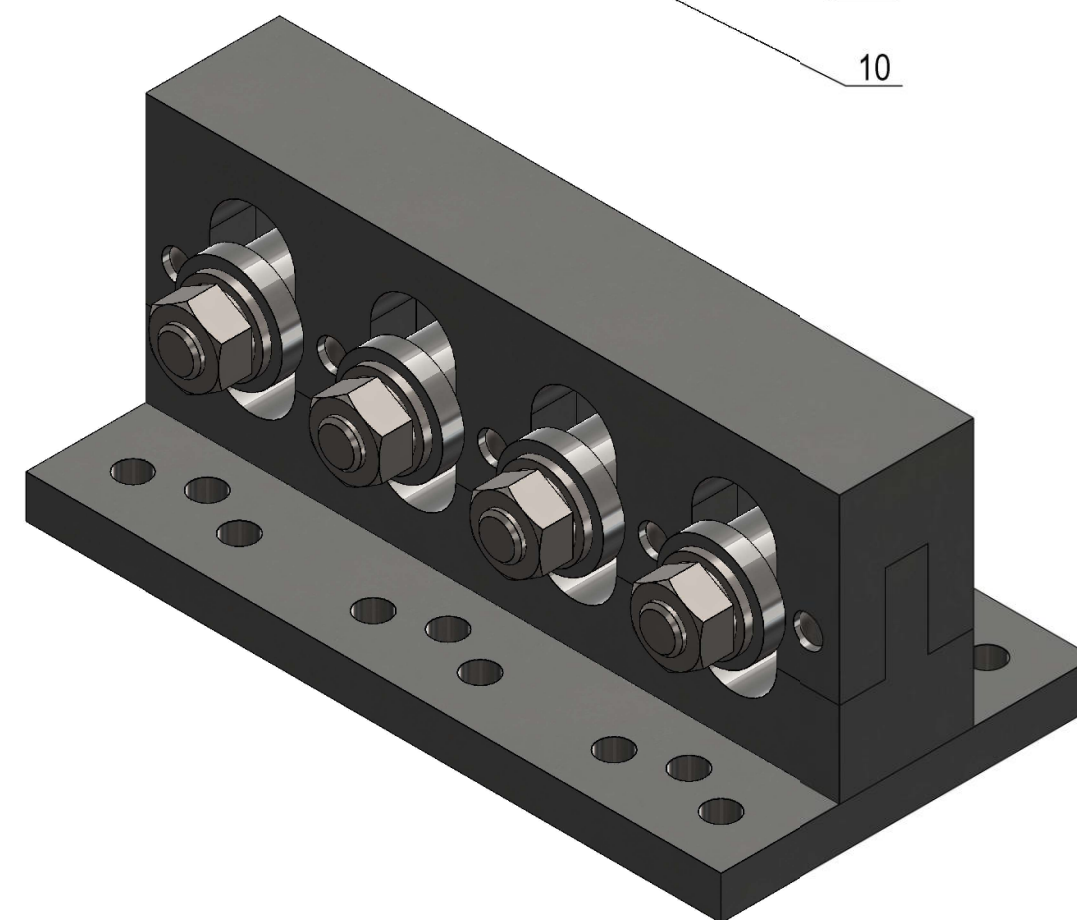
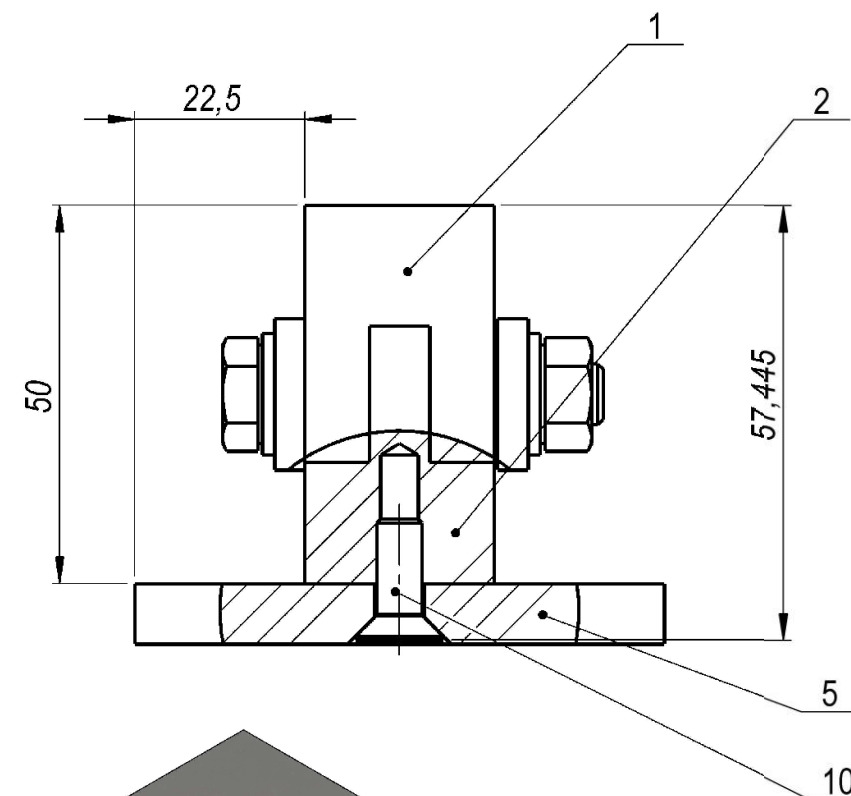
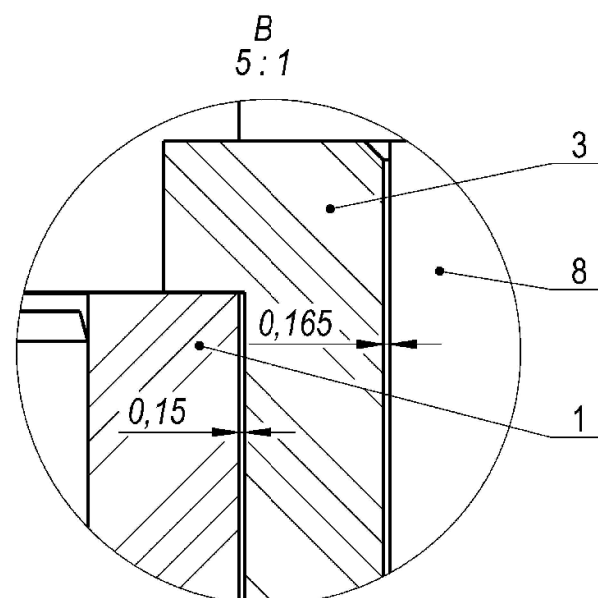
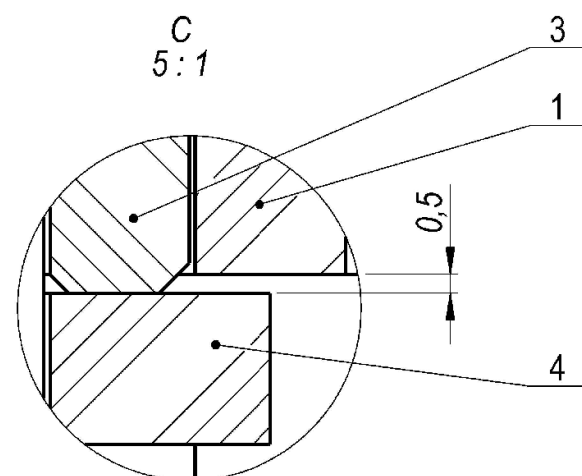
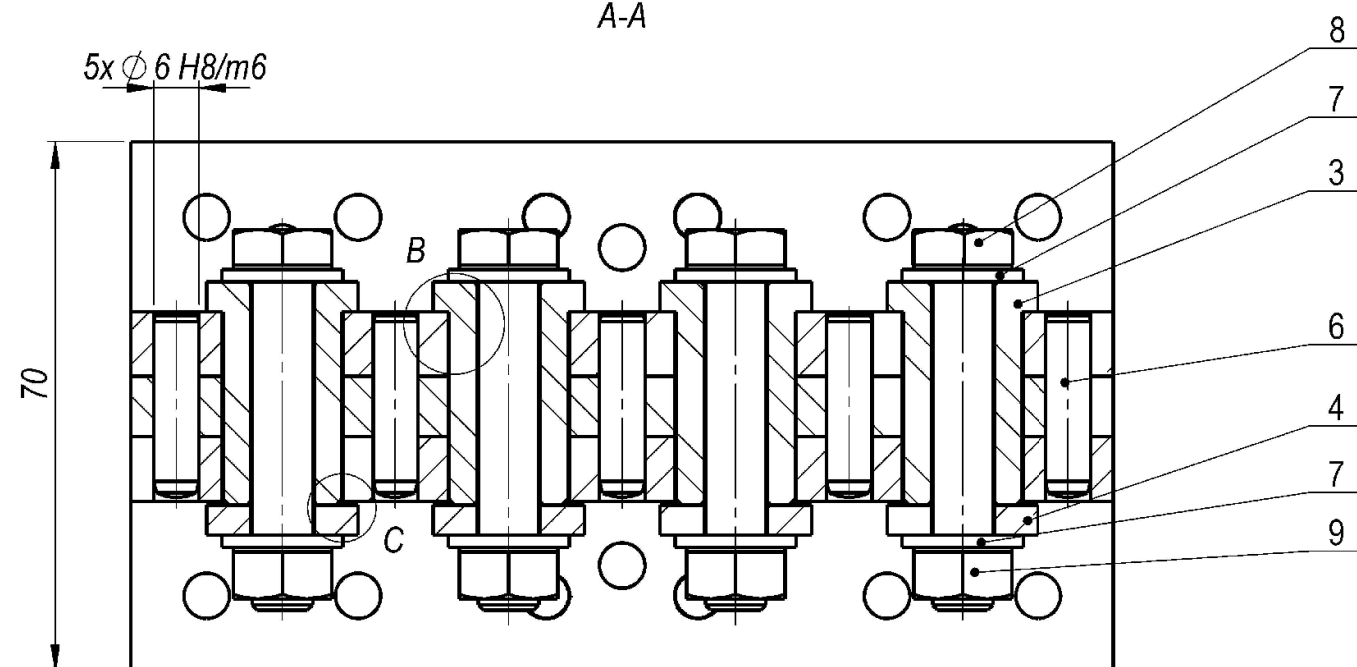


1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

|                          |                               |                                     |                                          |                                                    |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                          | Byla, laikmena                | Papildoma informacija               | Medžiaga<br>Konstrukcinis plienas S275J0 | Mastelis<br>M 1:1                                  |
| Atsakinga žinyba         | Vadovas                       | Dokumento tipas<br>Detalės brėžinys | Dokumento statusas<br>Mokomasis          |                                                    |
| Savininkas<br><b>KTU</b> | Rengė<br>Kasparas Vilkevičius | Antraštė<br>Tvirtinimo plokštė      | Žymuo<br>MBP.00.00.005                   |                                                    |
|                          | Tvirtino<br>Darius Eidukynas  |                                     | Laida<br>A                               | Data<br>2024-02-19<br>Kalba<br>lt.<br>Lapas<br>1/1 |



A-A



1. Nenurodytos matmenų, padėties ir formos nuokrypos pagal LST EN 22768-mK
2. \* - informaciniai matmenys

| Byla, laikmena   | Papildoma informacija | Medžiaga          | Mastelis           |
|------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Atsakinga žinyba | Vadovas               | Dokumento tipas   | Dokumento statusas |
| Savininkas       | Rengė                 | Antraštė          | Žymuo              |
| KTU              | Kasparas Vilkevičius  | Testavimo stendas | MBP.00.00.000      |
| Tvirtino         | Darius Eidukynas      | Laida             | Data               |
|                  |                       | A                 | 2024-05-03         |
|                  |                       | Kalba             | Lapas              |
|                  |                       | lt.               | 1/2                |

[illegible]