



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos po smūgio į  
kliūtį deformacijų tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Reda Kudrauskaitė**

Projekto autorė

**Lekt. Dr. Dainius Vaičiulis**

Vadovas

---

**Panevėžys, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos po smūgio į  
kliūtį deformacijų tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas  
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

---

**Reda Kudrauskaitė**

Projekto autorė

**Lekt. Dr. Dainius Vaičiulis**

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

---

**Panevėžys, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Reda Kudrauskaitė

## **Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos po smūgio į kliūtį deformacijų 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 nustatytą 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.

Reda Kudrauskaitė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**TVIRTINU**  
TVKC vadovė  
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

### **Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Diplomantei ***Redai Kudrauskaitėi***

Baigiamojo projekto tema lietuvių kalba

*LENGVOJO AUTOMOBILIO PUSRĖMIO SKERSINĖS SIJOS PO SMŪGIO Į KLIŪTĮ  
DEFORMACIJŲ TYRIMAS*

Baigiamojo projekto tema anglų kalba

*INVESTIGATION OF THE CAR FRAME TRAVERSE BEAM DEFORMATIONS AFTER IMPACT  
ON AN OBSTACLE*

Patvirtinta 2021 m. balandžio 2 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-13.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2021 m. gegužės 31 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

*Tyrimą atlikti bent prie trijų skirtingų susidūrimo greičių, panaudojant bent du skirtingus sijos profilius. Skaičiavimams naudoti baigtinių elementų metodą.  
Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų formaliuosius reikalavimus.*

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

*1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslinius darbus/tyrimus susijusius automobilio skersinės pusrėmio sijos „elgsena“ smūgio metu.  
2. Atlikti skaičiavimus, kurių metu būtų nustatytos automobilio skersinės pusrėmio sijos deformacijos smūgio metu, nustatyti automobilio greičio susidūrimo metu, sijos profilio pavidalo ir profilio sienelės storio įtaką sijos deformacijoms.*

Vadovas

*Lekt. dr. Dainius Vaičiulis*

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau:

*Reda Kudrauskaitė*

(studento vardas, pavardė, parašas)

2021 m. balandžio 19 d.

Kudrauskaitė, Reda. Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos po smūgio į kliūtį deformacijų tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): transporto inžinerija, technologijos mokslai, (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: skersinė sija; smūgis; deformacija.

Panevėžys, 2021. 62 p.

### **Santrauka**

Automobiliai ir avarijos – neatsiejami dalykai. Pirmosios automobilių sukeltos avarijos yra datuojamos jau nuo XIX amžiaus, kuomet automobilių istorija buvo dar tik beprasidedanti. Automobiliams tobulėjant, atsirandant vis didesniam greitesnių transporto priemonių poreikiui bei jų kainoms tapus prieinamoms kone kiekvienam dirbančiam žmogui, į gatves išriedančių automobilių kiekis ženkliai šoktelėjo, o kartu su didėjančiu automobiliu skaičiumi, neišvengiamai augo ir avaringumas. Daugeliui avarių turint tragiškas pasekmes, kuomet žūdavo žmonės, automobilių gamintojams teko nemenka užduotis – kuriamas transporto priemones patobulinti taip, kad avarijos metu vairuotojo ir keleivių patiriami sužalojimai būtų kaip įmanoma mažesni, o apsaugant keleivius bei krovinį, žūčių avarių metu kiekis sumažintas maksimaliai. Šiam tikslui pasiekti automobilių gamintojai savo kuriamas transporto priemones tobulino, pradėti naudoti įvairūs saugos komponentai, aktyvios bei pasyvios saugos sistemos, o galiausiai, prieš pradėdant naujų transporto priemonių masinę gamybą, automobilių saugai įvertinti pradėti taikyti susidūrimo bandymai, kurie imituoja tam tikrų avarių kelyje sąlygas. Šiuolaikiniai susidūrimo bandymai yra labai įvairūs bei informatyvūs, jų metu puikiai atsiskleidžia tiek silpnosios, tiek stipriosios automobilio pusės, pastebima, ką dar reikėtų patobulinti. Tačiau išbandant automobilius susidūrimo bandymuose, automobilis yra vertinamas kaip visų komponentų visuma, nors didžiausią darbą smūgio metu atlieka konstrukcijos, kurios yra kiek giliau nei matomos kėbulo dalys ir dailus eksterjeras. Dar platesniam suvokimui, kaip reaguoja tam tikri, atskiri komponentai ar jų sistemos smūgio ar avarijos metu, yra taikomi individualūs bandymai šioms konstrukcijoms.

Šio tyrimo metu yra nagrinėjamas vienas tokių, individualių bandymų, kurio metu yra tiriamos deformacijos bei įtempimai, susidarantys lengvojo automobilio pusrėmio skersinėje sijoje smūgio metu. Šis komponentas tyrimui pasirinktas neatsitiktinai – priekinis smūgis yra vienas iš dažniausiai pasitaikančių avarijos tipų. Tyrimo metu stebima, kaip keičiant pusrėmio skersinės sijos geometriją, sijos parametrus, tokius kaip sijos sienelės storis, ar sijos gamybai naudojama medžiaga, ir kt. kinta absoliutinės deformacijos po smūgio ir kokie maksimalūs įtempimai yra pasiekiami. Tokio tipo bandymai yra reikšmingi sijos optimizavimo procese.

Šiam tyrimui, smūgio metu atsirandančių deformacijų ir įtempimų skaičiavimams naudojamas *Solidworks Simulation* programinės įrangos paketas. Pradinis sijos skaičiavimams pasirenkamas modelis – *Volkswagen Passat B5* automobilio pusrėmio skersinė sija. Tyrimo metu stebimas deformacijų bei įtempimų kitimas darant pakeitimus sijoje bei vertinama, ar tokio tipo pokyčiai yra naudingi tiek smūgio sugeriamumo, tiek detalės gamybos kainos, detalės gamybos sudėtingumo bei našumo prasme.

Kudrauskaitė, Reda. Investigation of the car frame traverse beam deformation after impact on an obstacle. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering, Technology Sciences, (Engineering Sciences).

Keywords: traverse beam; impact; deformation.

Panevėžys, 2021. 62.

### Summary

Cars and accidents are inseparable. The first car accidents have been dated since the 19th century, when the history of cars was just at its beginning. With the development of cars, with the growing demand for faster means of transport and the occurring availability of affordable cars for every working person, the number of cars appearing out on the streets rose, however, with the growing number of cars, accidents inevitably increased. The tragic consequence of many accidents, which have resulted in fatalities was not acceptable. Car manufacturers had a challenge to lower the injuries and started working on a significant task, which main goal was to improve vehicles so that injuries to the driver and passengers are kept to a minimum. To achieve this goal, car manufacturers had to improve their vehicles, they introduced various safety components, developed active and passive safety systems, and finally, before launching new mass-produced vehicles, collision tests that simulate the conditions of certain road accidents have been introduced to assess car safety. Modern crash tests are very diverse and informative, it is revealing both, the weaknesses, and the strengths of the car, so it can be noticed which parts still needs to be improved. However, while testing the car in a crash test, the car is seen as a set of all the components, although the greatest work is performed on structures that are slightly deeper than visible body parts and a sleek exterior. For an even broader understanding of how certain, individual components or their systems react in the event of an impact or accident, individual tests can be applied to these structures.

This study deals with one such individual test, which examines the deformations and stresses that occur in the traverse beam of a passenger car during an impact. This component was chosen for the study for a reason – a frontal impact is one of the most common types of accidents. During the study, it is observed how by changing the geometry of the passenger car frame transverse beam, beam parameters such as beam wall thickness, or materials that are used for beam production, etc. the absolute deformations after impact vary and what maximum stresses are achievable. This type of testing is significant to the traverse beam optimization process.

For this study, the calculations of deformations and stresses during impact is performed using *Solidworks Simulation* software. The initial model for these calculations is the traverse beam that is used on *Volkswagen Passat B5* model cars. The study observes changes in deformations and stresses when making changes in the traverse beam and assesses whether this type of change is beneficial in terms of shock absorption and component production cost, component production complexity and performance changes.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Automobilio sauga: susidūrimo bei konstrukcijų bandymai .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Skersinė pusrėmio sija: paskirtis, projektavimas, bandymai, optimizavimas.....</b>	<b>16</b>
2.1. Mažo greičio ir didelio greičio bandymai .....	16
2.2. Skersinės pusrėmio sijos vaidmuo pėsčiųjų saugoje .....	16
2.3. Skersinės pusrėmio sijos gamyboje naudojamos medžiagos .....	17
2.4. Skersinės pusrėmio sijos dizainas bei optimizavimas .....	17
2.4.1. Skersinės sijos bandymai.....	19
2.4.2. Pusrėmio skersinių sijų, kurių gamybai naudojamos skirtingos medžiagos, bandymai.....	21
2.4.3. Pusrėmio skersinės sijos smūgio energijos sugeriamumo bandymai .....	22
<b>3. Skersinės sijos 3D modelis ir uždavinio modeliavimas .....</b>	<b>25</b>
3.1. Skaitinio uždavinio <i>Solidworks Simulation</i> aplinkai modeliavimas .....	26
<b>4. Skersinės sijos deformacijų ir įtempimų, kylančių centrinio smūgio metu, tyrimai.....</b>	<b>29</b>
4.1. Sijos gamybai naudojamos medžiagos įtaka .....	29
4.2. Sijos sienelės storio ir gamybai naudojamos medžiagos įtaka.....	30
4.3. Sijos skerspjūvio įtaka.....	39
4.3.1. Keičiamas sijos sienelės storis modifikuotame skerspjūvyje.....	39
4.4. Sijos įtvirtinimo taškų įtaka.....	43
4.5. Sijos standumo briaunų įtaka.....	46
4.5.1. Standumo briaunų storis .....	46
4.5.2. Standumo briaunų išdėstymo tankis.....	49
4.6. Standumo briaunų forma .....	52
<b>Išvados .....</b>	<b>56</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>57</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>60</b>
1 priedas. Tyrimų rezultatų suvestinė.....	60

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Tiriamų medžiagų mechaninės savybės [23-25] .....	28
<b>2 lentelė.</b> Absoliutinių deformacijų bei maksimalių įtempimų kitimas keičiant skersinės pusrėmio sijos medžiagą ir profilio sienelės storį. ....	60
<b>3 lentelė.</b> Absoliutinių deformacijų bei maksimalių įtempimų kitimas keičiant skersinės pusrėmio sijos profilio sienelės storį modifikuotame profilyje.....	60
<b>4 lentelė.</b> Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje 3 tvirtinimo taškus, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm.....	61
<b>5 lentelė.</b> Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingo standumo briaunų tinklelį, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm .....	61
<b>6 lentelė.</b> Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingus standumo briaunų kiekius, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm.....	61
<b>7 lentelė.</b> Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingas standumo briaunų formas, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm .....	62



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Mažo persidengimo (kairėje) ir vidutinio persidengimo (dešinėje) priekinį smūgį imituojantys bandymai [2].....	13
<b>2 pav.</b> Trys pagrindinės kėbulo erdvės [4].....	14
<b>3 pav.</b> Mercedes Benz C klasės automobilio skersinė pusrėmio sija (mėlyna) įtvirtinta ant išilginių sijų galų (pilka), prisukta bamperio sustiprinimo smūgio slopintuvais (žalia) [5].....	15
<b>4 pav.</b> Automobilio kėbulo gamyboje naudojamas skirtingo tvirtumo plienas ir jo lydiniai atsižvelgiant į konstrukcijų svarbą [10].....	17
<b>5 pav.</b> Sijos skerspjūvis apibrėžtas šešiais pagrindiniais taškais ir septyniais kintamaisiais [11] ....	18
<b>6 pav.</b> Sijos kritinės sritys [11].....	19
<b>7 pav.</b> Baigtinių elementų modelis, trys smūgių tipai [15].....	20
<b>8 pav.</b> Modernizuoti bamperio sijos smūgio slopintuvai [15] .....	21
<b>9 pav.</b> Ant skersinės pusrėmio sijos naudojama papildoma apsaugos zona [15].....	21
<b>10 pav.</b> Simuliacijos ir realaus bandymo rezultatų palyginimas [12].....	24
<b>11 pav.</b> Automobilio Volkswagen Passat B5 skersinės pusrėmio sijos skerspjūvis (kairėje), sijos lenkimo spindulys ir 3D modelis (dešinėje).....	25
<b>12 pav.</b> Paviršius-taškas kontakto veikimo principas [26].....	26
<b>13 pav.</b> Tyrimui parinkta kliūtis.....	26
<b>14 pav.</b> Kliūties smūgio į siją modelis .....	27
<b>15 pav.</b> Sijos įtvirtinimo vietos .....	27
<b>16 pav.</b> Smūgio metu sijos ir ritinio kontaktuojantys paviršiai.....	27
<b>17 pav.</b> Baigtinių elementų tinklelio tankis .....	28
<b>18 pav.</b> Vizualiniai pokyčiai 3mm sijos po smūgio visais tiriamais greičiais: viršuje – sijos skerspjūviai (mastelis 1:10), apačioje – sijos vaizdas iš viršaus .....	29
<b>19 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų smūgio vietoje priklausomybė nuo medžiagos, iš kurios pagaminta sija, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s .....	29
<b>20 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo medžiagos, iš kurios pagaminta sija, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	30
<b>21 pav.</b> Deformacijų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 3 mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 4 m/s, pjūvio (dešinėje) mastelis 1:10, apačioje – nedeformuotos sijos pjūvis .....	31
<b>22 pav.</b> Įtempimų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 3 mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 4 m/s.....	31
<b>23 pav.</b> Sijos pagamintos iš ALU 3105 lydinio absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	32
<b>24 pav.</b> Sijos pagamintos iš ALU 3105 lydinio maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	32
<b>25 pav.</b> Sijos pagamintos iš X5CrNi10-18 plieno absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo kliūties sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	33
<b>26 pav.</b> Sijos pagamintos iš X5CrNi10-18 plieno maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	33
<b>27 pav.</b> Sijos pagamintos iš S355N plieno absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	34

<b>28 pav.</b> Sijos pagamintos iš S355N plieno maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	34
<b>29 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 4m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N .....	35
<b>30 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 4 m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N .....	36
<b>31 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 10 m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N .....	36
<b>32 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu 10 m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N.....	37
<b>33 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 15 m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N .....	38
<b>34 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu 15 m/s, o sija yra pagaminta iš: ALU 3105; X5CrNi18-10; S355N.....	38
<b>35 pav.</b> Modifikuota originalaus sijos skerspjūvio forma.....	39
<b>36 pav.</b> Deformacijų pasiskirstymas modifikuoto profilio sijoje (kairėje, dešinėje – originalaus skerspjūvio sija), kuomet sijos sienelės storis 5mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 15m/s, pjūvio (apačioje) mastelis 1:10.....	40
<b>37 pav.</b> Įtempimų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 5mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 15m/s, kairėje – modifikuoto skerspjūvio sija, dešinėje – originalaus skerspjūvio sija.....	40
<b>38 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	41
<b>39 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, o greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	41
<b>40 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybės palyginimas nuo sijos sienelės storio, kuomet naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, o greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s ir originalaus skerspjūvio sija, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s .....	42
<b>41 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybės palyginimas nuo sijos sienelės storio, kuomet naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, o greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s ir originalaus skerspjūvio sija, kai greitis smūgio metu yra: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	43
<b>42 pav.</b> Sijos įtvirtinimo taškai .....	43
<b>43 pav.</b> Įtempimų pasiskirstymas sijoje įtvirtintoje 2 kartus didesniame plote, kai greitis smūgio metu 15 m/s .....	44
<b>44 pav.</b> Deformacijų pasiskirstymas sijoje įtvirtintoje 2 kartus didesniame plote, kai greitis smūgio metu 15 m/s, pjūvio (kairėje) mastelis 1:5 .....	44
<b>45 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų smūgio vietoje priklausomybė nuo tvirtinimo ploto, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	45
<b>46 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo tvirtinimo ploto, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	45
<b>47 pav.</b> 4mm storio standumo briaunų tinklelis profilio viduje.....	46
<b>48 pav.</b> Įtempimų pasiskirstymas sijoje su 4 mm storio standumo briaunų tinkleliu, kai greitis smūgio metu 15 m/s .....	47
<b>49 pav.</b> Deformacijų pasiskirstymas sijoje su 4 mm storio standumo briaunų tinkleliu, kai greitis smūgio metu 15 m/s, pjūvio mastelis 1:10 .....	47

<b>50 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų tinklelio storio, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	48
<b>51 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų tinklelio storio, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	49
<b>52 pav.</b> Skirtingas standumo briaunų išdėstymas ant skersinės pusrėmio sijos.....	50
<b>53 pav.</b> Standumo briaunos geometrija.....	50
<b>54 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų skaičiaus, greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	51
<b>55 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų kiekio, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	51
<b>56 pav.</b> Standumo briaunų formos a variantas .....	53
<b>57 pav.</b> Standumo briaunų formos b variantas.....	53
<b>58 pav.</b> Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų formos, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	54
<b>59 pav.</b> Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų formos, kai greitis smūgio metu: 4 m/s; 10 m/s; 15 m/s.....	54

## Ivadas

Eksterjeras bei greičio, sukimo momento, kuro vartojimo, komforto ir kiti parametrai yra svarbūs automobilių siūlant rinkai, tačiau sauga yra vienas tų aspektų, kuriuos gamintojas turi užtikrinti pirmiausia. Saugos sistemų bei paties kėbulo saugos testai dažnai leidžia gamintojams, dizaineriams bei inžinieriams žinoti esamas modelio problemas, jas analizuoti bei stengtis ištaisyti kritines vietas kiek įmanoma labiau, su sekančiu naujesnės kartos modelio pasirodymu.

Sauga neginčytinai turėtų būti vienas pirmųjų kriterijų renkantis naują automobilį, nes nepaisant to, kokios paskirties transporto priemonė bus, jos tikslas – saugiai gabenti vairuotoją, keleivius bei krovinį. Tam, kad vartotojui būtų patogų vertinti automobilio saugumą, nereikia būti šios srities specialistu – kiekvienas naujas automobilio modelis yra išbandomas nepriklausomų tyrėjų-ekspertų komandos ir yra paruošiama išsami analizė, kuri yra puikiai suprantama net visai su šia sritimi nesusidūrusiems asmenims.

Skaidant automobilį į tam tikras sritis, skirstant detales į grupes, pagal jų funkciją, nemažą dalį sudarytų būtent saugos elementai. Pradedant pasyvaus bei aktyvaus saugumo sistemomis ir baigiant automobilio kėbulo forma – visi elementai yra sukurti individualiai ir atsižvelgiant į jų gebėjimą tenkinti gamintojo užsiduotas sąlygas, kurios yra iškeltos tam, kad būtų sukuriamas maksimalus saugumas tiek keleiviams, tiek pėstiesiems.

Vieni automobilio elementai turi sugerti smūgio jėgą, kiti turi ją išskirstyti, treči būti kaip įmanoma atsparesni deformavimuisi. Būtent tam, kad suprasti kaip atskiri elementai susitvarko su staiga atsirandančiomis jėgomis ir kokį vaidmenį jie atlieka avarijos metu, yra atliekami ne automobilio, kaip visumos, o atskirų elementų atsparumo bandymai.

**Baigiamojo projekto tikslas:** ištirti kaip smūgio metu deformuojasi automobilio pusrėmio skersinė sija, kokią įtaką sijos deformacijoms turi sijos sienelės storis, sijos gamybai naudojama medžiaga, standumo briaunos, jų kiekis bei storis, sijos skerspjūvio forma.

Darbo tikslui pasiekti iškeliami **uždaviniai:**

1. Mokslinės literatūros apžvalga.
2. Nustatyti kaip kinta sijos deformacijos bei įtempimai priklausomai nuo:
  - sijos medžiagos;
  - sijos geometrijos (sijos sienelės storio, sijos ir jos profilio pavidalo);
  - sijos kraštinių sąlygų (įtvirtinimų vietos).

**Pranešimai ir moksliniai darbai baigiamojo projekto tematika.** Dalyvauta studentų mokslinėje konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2021“ (TVA-2021), vykusioje Panevėžyje 2021 m. balandžio 23 d. Skaitytas pranešimas tema „Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos po smūgio į kliūtį deformacijų tyrimas“. Pranešimo pagrindu parengtas straipsnis, kuris įtrauktas į studentų mokslinės konferencijos TVA-2021 darbų rinkinį.

**Baigiamojo projekto sandara ir apimtis.** Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, lentelių ir paveikslukų sąrašai, įvadas, keturi skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Aiškinamojo rašto apimtis 62 p., kuriuose yra 59 paveikslukai ir 7 lentelės.

## 1. Automobilio sauga: susidūrimo bei konstrukcijų bandymai

Susidūrimo bandymas (angl. *Crash test*) yra vienas iš būtinųjų automobilio saugos testavimo būdų. Bandymo metu automobiliuose yra įsodinti manekenai, kurie yra pagaminti pagal vidutiniško žmogaus proporcijas, išlaikant atitinkamą svorį, kūno poziciją važiuojant. Jie yra reikalingi tam, kad būtų galima nuspėti, kaip susidūrimo metu judės vairuotojo kūnas, kokie galimi sužeidimai, kurios kūno vietos pažeidžiamos labiausiai, o kurios yra geriausiai apsaugotos [1].

Yra nemažai avarijos bandymų tipų, kurie yra atliekami transporto priemonėms, kad būtų galima kiek įmanoma plačiau suprasti, kaip automobilis ir keleiviai jame reaguoja į atsirandančias jėgas avarijos metu. Įvairūs bandymų tipai imituoja dažniausiai pasitaikančias avarijas kelyje:

- priekinį smūgį imituojantis bandymas;
- vidutinio persidengimo priekinį smūgį imituojantis bandymas (angl. *Moderate overlap frontal test*). (1 pav.);
- vairuotojo pusės mažo persidengimo priekinį smūgį imituojantis bandymas (angl. *Driver-side small overlap frontal test*). (1 pav.);



**1 pav.** Mažo persidengimo (kairėje) ir vidutinio persidengimo (dešinėje) priekinį smūgį imituojantys bandymai [2]

- keleivio pusės mažo persidengimo priekinį smūgį imituojantis bandymas (angl. *Passenger-side small overlap frontal test*);
- šoninio smūgio bandymas (angl. *Side crash test*);
- stogo stiprumo bandymas (angl. *Roof strength test*).

Dažniausiai tokių bandymų metu įvertinami galimi vairuotojo ir keleivių sužalojimai, galvos apsauga, struktūrinis konstrukcijos atsparumas smūgiams. Taip pat, bandymu metu yra nustatomas apsauginių priemonių efektyvumas ir patikimumas bei pačios konstrukcijos sauga. Automobilio smūgio imitavimo bandymų yra daug daugiau, tačiau jie yra smulkesni, specifiniai, jais tiriami konkretūs elementai ar avarijos metu patiriami judesiai.

Dažniausiai konstrukcijų tyrimai apima tas automobilio vietas, kurios yra tiesiogiai susijusios su tuo kaip gerai automobilis atlaikys susidūrimo bandymą, kaip gerai atlaikys smūgį, kaip apsaugos

vairuotoją, keleivius bei krovinį. Pagrindinė automobilio kėbulo paskirtis – maksimaliai apsaugoti salone esančius asmenis ir nelaimės atveju netgi išgelbėti jiems gyvybę.

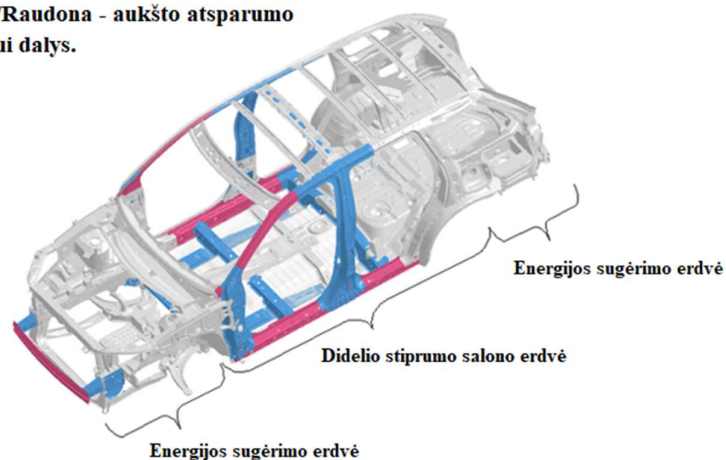
Konstruktivių elementų bandymai gali būti labai įvairūs, priklausomai nuo to kurias konstrukcijas, sistemas, mazgus ar detales planuojama tirti. Kitaip tariant, skirtingos sistemos atlieka skirtingas funkcijas avarijos metu, todėl projektuojant transporto priemonės svarbūs yra ir apsaugos prioritetai.

Dažnai apsaugos prioritetai yra skirstomi pagal tai, koku greičiu juda transporto priemonė prieš įvykstant susidūrimui:

- jei susidūrimas įvyksta transporto priemonei judant iki ~15 km/h greičiu – pagrindinis tikslas yra sumažinti remonto po avarijos kaštus;
- jei susidūrimas įvyksta transporto priemonei judant 15 – 40 km/h greičiu – pirmiausia siekiama apsaugoti pėsčiuosius;
- jei greitis didesnis nei 40 km/h – prioritetas yra vairuotojo ir keleivių sauga.

Pagrindiniai apsaugos nuo smūgio komponentai yra automobilio priekyje ir gale. 2 paveikslėlyje puikiai matomos kokios erdvės automobilyje yra paliekamos smūgio sugėrimui, o kokia erdvė yra paliekama vairuotojui ir keleiviams.

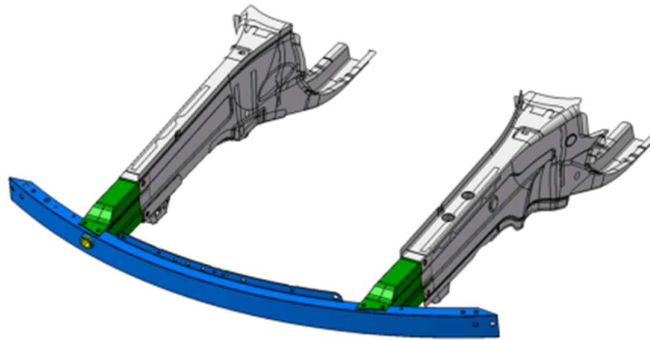
**Mėlyna/Raudona - aukšto atsparumo tempimui dalys.**



**2 pav.** Trys pagrindinės kėbulo erdvės [4]

Kiek dažniau tyrimai bei bandymai yra atliekami automobilio konstrukcijų deformacijoms nustatyti esant priekiniam smūgiui. Priežastis gana akivaizdi – dažniausiai mirtinos avarijos yra būtent priekine automobilio dalimi įsirežus į standžią kliūtį, tokią kaip medis, kelio apšvietimo stulpas, betoninė siena/atitvaras, ar viena pavojingiausių situacijų kelyje – kaktomuša su kitomis transporto priemonėmis.

Priekinio smūgio metu didžiausią smūgio dalį sugeria automobilio priekyje esančios priekinės išilginės sijos ir ant jų galų, panaudojant smūgio slopintuvus (angl. *crash box*), pritvirtinta pusrėmio skersinė sija (3 pav.).



**3 pav.** Mercedes Benz C klasės automobilio skersinė pusrėmio sija (mėlyna) įtvirtinta ant išilginių sijų galų (pilka), prisukta bamperio sustiprinimo smūgio slopintuvais (žalia) [5]

Dažniausiai ši konstrukcija yra pagaminta iš aliuminio. 3 paveikslėlyje pavaizduota sistema Mercedes Benz inžinierių pasirinkimu buvo pagaminta pilnai iš aliuminio. Ši sistema atlieka didžiausią darbą priekinio smūgio metu, todėl projektuojant jai skiriamas didelis dėmesys. Kiek rečiau tyrinėjamos atskiros šios konstrukcijos dalys.

Bendra priekinės automobilio dalies sistema (3 pav.) taip pat yra tobulinama. Dabar sutinkama sistema, kuomet ant išilginių sijų galų yra bamperio smūgio slopintuvai, kurie varžtais tvirtinasi tiek prie skersinės, tiek prie išilginės sijos, vienu metu atlieka du naudingus darbus:

1. Po avarijos yra daug lengviau nuimti ir pakeisti detales naujomis – nereikia nieko pjaustyti ir virinti, taip susilpninant konstrukciją. Taip yra palengvinamas darbas automechanikams bei pigesni remonto kaštai yra labai patrauklūs draudimo kompanijoms.
2. Smūgio slopintuvai yra suprojektuoti taip, kad esant smūgiui jie deformuotųsi pirmi, taip apsaugant skersinę siją. Tik tada, kai smūgio slopintuvai deformuotis nebegali, pradeda deformuotis skersinė sija.

## 2. Skersinė pusrėmio sija: paskirtis, projektavimas, bandymai, optimizavimas

Skersinė pusrėmio sija yra tyrinėjama rečiau, nei bendra šios sijos ir priekinių išilginių sijų sistema, ar pačios priekinės išilginės sijos. Būtent dėl to, skersinės pusrėmio sijos deformacija smūgio į kliūtį metu bus plačiau aptariama ir tiriama šiame darbe.

Bendra šios sistemos paskirtis bei reikalavimai:

- sugerti energiją susidūrimo metu ir nukreipti likusias bei susidariusias jėgas į kitas kėbulo konstrukcijas;
- atitikti įstatyminius reikalavimus dėl energijos sugeriamumo;
- užtikrinti kiek įmanoma mažesnę transporto priemonės apgadinimą (esant mažiems ir vidutiniams greičiams);
- esant dideliems greičiams – nukreipti susidūrimo jėgas į kėbulo struktūrą taip, kad kėbulo struktūros suirimo tikimybė būtų nedidelė ir būtų užtikrintas keleivių išgyvenimas.

### 2.1. Mažo greičio ir didelio greičio bandymai

Esant skirtingiems greičiams smūgio į kliūtį metu, skiriasi ir patiriami apgadinimai. Priekinė automobilio dalis turi tenkinti nemažai sąlygų, o kai kurios iš jų prieštarauja viena kitai. Tam, kad būtų nustatyti negrįžtamieji įvairių kėbulo dalių pokyčiai smūgio metu, silpnosios ir stipriosios konstrukcijos ir elementų vietos, yra atliekami įvairūs bandymai. Kaip ir minėta anksčiau, dažniausiai pasitaikantys yra didelio greičio ir mažo greičio bandymai. Šių bandymų metu stebima kaip skersinė pusrėmio sija sugeria smūgį, deformuojasi, išskirsto smūgio metu atsiradusią energiją.

**Didelio greičio avarijos bandymai** – tai bandymai atliekami esant dideliems greičiams (nuo 45 km/h) kuomet smūgis yra patiriamas iš priekio, iš šono bei iš galo. Šio bandymo metu yra vertinama automobilio viduje esančio asmens išgyvenamumas bei pėsčiųjų apsauga.

**Mažo greičio avarijos bandymai** – tai bandymai (iki 15 km/h), kurių metu stebima, kaip stipriai apsigadina automobilio detalės ir kokio dydžio išmoką turėtų pateikti automobilių draudimo kompanija nukentėjusiajam asmeniui. Bandymas imituoja dažniausiai pasitaikančias mažo greičio avarijas, pavyzdžiui parkuojantis. Šio bandymo informacija aktualiausia draudimo kompanijoms.

Tuo tarpu didelio greičio avarijos metu minimalių transporto priemonės apgadinimų pasiekti nepavyks, todėl šio tipo avarijose skersinės sijos sistema atlieka kitą, tačiau dar svarbesnę funkciją – siekia apsaugoti vairuotoją ir keleivius nuo sunkių sužalojimų bei išsaugoti jų gyvybes [6].

### 2.2. Skersinės pusrėmio sijos vaidmuo pėsčiųjų saugoje

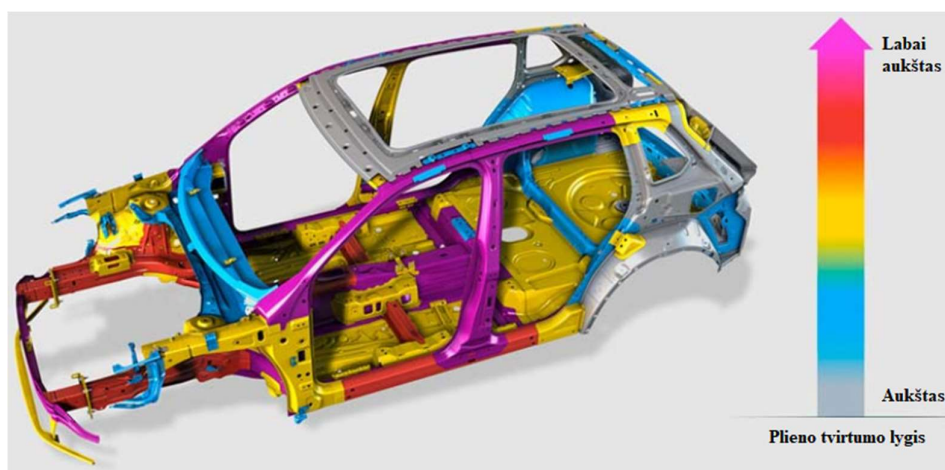
Skersinė pusrėmio sija yra kėbulo priekyje, todėl projektuojant ją reikia atsižvelgti į dar vieną papildomą faktorių – pėsčiuosius. Dažniausiai susidūrimas su pėsčiaisiais įvyksta būtent priekine automobilio dalimi. Kuomet kalbama apie bandymus atliekamus dėl pėsčiųjų apsaugos, atsiranda prieštaravimai prieš tai aptarties bandymams, kurių metu stengiamasi automobilį kiek įmanoma mažiau apgadinti smūgio metu. EC direktyvoje [7] dėl pėsčiųjų apsaugos 2003/102 / EC (paskelbtoje 2003 m. Gruodžio 6 d.) yra paskelbti pėsčiųjų apsaugos reikalavimai, kurie nustatyti dviem etapais. Abiejuose etapuose taikomos tos pačios bandymo sąlygos, tačiau 2 etape taikomas griežtesnis traumų vertinimas (galioja nuo 2005 m. Spalio 1 d.). Papildomą energiją sugerianti medžiaga dažnai naudojama apsaugai nuo avarijų ir draudimo įvertinimams pagerinti. Tačiau kuomet kalba pasisuka apie pėsčiųjų saugą, reikia optimizuoti energiją sugeriančios medžiagos storį, plotį, aukštį ir



standumą, nes susidūrimo su pėsčiaisiais atveju atsiranda visai kitas prioritetas – kiek įmanoma labiau apsaugoti pėsčiąjį nuo galimų sunkių sužalojimų. Todėl atstumas tarp buferio paviršiaus ir skersinės sijos yra ribotas. Kai kurių gamintojų naudojamas energijos, susidariusios dėl smūgio į buferį, valdymo metodas kartu apjungia energiją sugeriantį elementą ir prie išilginės sijos pritvirtintus smūgio slopintuvus. Šis išdėstymas sudaro dviejų pakopų energijos valdymo sistemą. Pėsčiųjų saugos bandymai yra atliekami esant laisvam riedėjimui, 13,4 kg kojos formos kliūtis juda 40 km/h greičiu. Proceso metu, buferio energiją sugeriantis elementas (pvz., Putplasčio padas) turi absorbuoti 830 J energiją [8].

### 2.3. Skersinės pusrėmio sijos gamyboje naudojamos medžiagos

Dažniausiai automobilių kėbulo dalims naudojamas plienas ir jo lydiniai (4 pav.) tačiau be jų dar labai dažnai naudojami aliuminio lydiniai, magnio lydiniai, kompozitinės medžiagos bei plastikas ir jo lydiniai [10].



4 pav. Automobilio kėbulo gamyboje naudojamas skirtingo tvirtumo plienas ir jo lydiniai atsižvelgiant į konstrukcijų svarbą [10]

Skirtumas tarp didelio tvirtumo plieno ir labai didelio tvirtumo plieno yra paties metalo struktūroje, priklausomai nuo to, kiek pliene yra austenito, ferito, martensito bei legiruojančių elementų, tokių kaip nikelis, chromas, molibdenas ir pan. [9]. Kiekvienai detalei medžiagos parenkamos atsakingai priklausomai nuo to, kokį darbą detalė ar komponentas atliks.

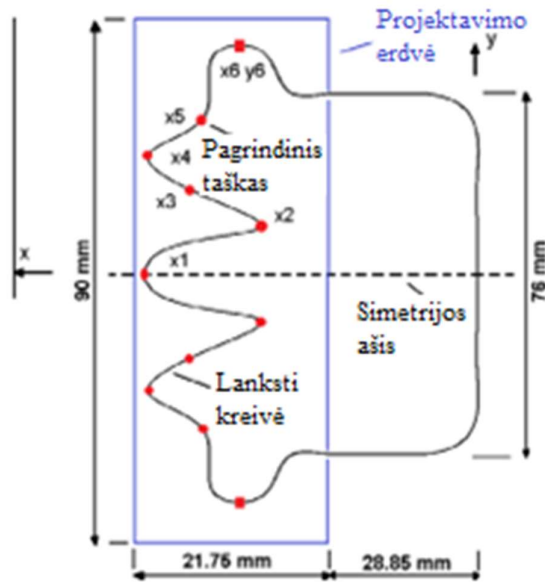
Skersinės pusrėmio sijos gamybai dažniausiai naudojamos ir dažniausiai tyrinėjamos yra trys medžiagos:

1. Didelio stiprumo lakštų liejimo kompozitas (SMC – *Sheet molding compound*).
2. Stiklo termoplastikas (GMT – *Glass mat thermoplastic*).
3. Aliuminis.

### 2.4. Skersinės pusrėmio sijos dizainas bei optimizavimas

Skersinės sijos profilis dažniausiai yra gaminamas ekstruzijos būdu [13], o tai reiškia, kad skersinės sijos skerspjūvio pavidalas gali būti pakankamai sudėtingas. Norint optimizuoti skersinę siją iš tiesų reikia optimizuoti jos skerspjūvį. Skersinės sijos skerspjūvio formos optimizavimo kintamieji yra pagrindinių taškų, naudojamų sijos skerspjūviui apibrėžti, koordinatės (5 pav.). Pavyzdžiui,

skerspjūvį gali apibūdinti šeši pagrindiniai taškai, kaip pavaizduota 5 paveikslėlyje. Penki iš jų gali laisvai judėti tik x kryptimi, o vienas iš jų gali judėti abejomis x ir y kryptimis. Keičiant šių taškų vietas yra keičiama skerspjūvio forma. Optimizavimo tikslas – skersinės sijos atsparumas smūgiui turi būti didžiausias. Visą šią optimizavimo metodiką pateikia Niyazi Tanlakas kartu su kolegomis savo moksliniame darbe [11]. Čia pateikiama metodika, kaip atrasti optimalias šių taškų koordinatas bei kaip jas apskaičiuoti matematiškai. Autoriai pastebi, kad dėl sijos dydžio apribojimų, pagrindiniams taškams leidžiama judėti tik tam tikroje srityje. Tarpai esantys tarp pagrindinių taškų, tai yra tos zonos, kuriose pagrindiniai taškai gali laisvai judėti.



**5 pav.** Sijos skerspjūvis apibrėžtas šešiais pagrindiniais taškais ir septyniais kintamaisiais [11]

Kaip ir minėta anksčiau, skersinės sijos ir komponentų, kartu su ja sudarančių bendrą sistemą, pagrindinis darbas yra sugerti kinetinę energiją. Tam, kad būtų galima aiškiau suprasti, kokios jėgos veikia avarijos metu, galima pasinaudoti autorių [11] pateiktomis lygtimis, padėsiančiomis sumodeliuoti tikslesnes avarijos sąlygas. Remiantis pateiktais skaičiavimais, įprasto bandymo metu deformuojamos kliūtis sugertos energijos ir transporto priemonės masės santykis ženkliai nesikeičia kintant automobilio svoriui. Remiantis kompiuterinio modeliavimo rezultatais, kliūtis sugerama deformacijos energija yra gana maža palyginti su energija, kurią transporto priemonė sugeria per pirmąsias 10 ms nuo susidūrimo pradžios. Tik vėlesniuose susidūrimo etapuose barjeras ir transporto priemonė sugeria maždaug tokį patį energijos kiekį. Niyazi Tanlakas ir kiti autoriai [11] savo straipsnyje apie skersinės sijos optimizavimą peržvelgę visus optimizavimo etapus, galiausiai pateikia optimalias skerspjūvio formas ir pagrindinių taškų koordinatas. Šios skerspjūvių formos greta palyginamos su šiuo metu naudojamais skerspjūviais ir etalonais.

Tam, kad būtų įvertinamos smūgio metu atsirandančios deformacijos skersinėje pusrėmio sijoje, yra atliekami kelių tipų tyrimai:

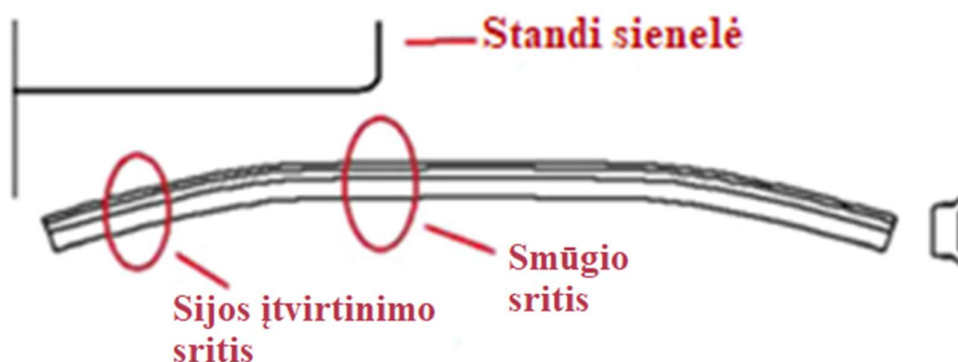
1. Realus smūgio į siją bandymas.
2. Kompiuterinė smūgio į siją simuliacija.

Darbo [11] autoriai apžvelgia šių bandymų privalumus bei trūkumus. Pasak jų, pirmasis bandymas yra greitas ir dažniausiai rezultatai yra artimesni į realiomis gyvenimo sąlygomis patirto smūgio kelyje metu atsirandančius apgadinius. Tačiau šiam bandymui reikalingas standas, tyrimas yra brangus, nes būtina atlikti seriją bandymų kaskart naudojant sveiką siją. Kuo daugiau bandymų atliekama, tuo patikimesnės išvados gali būti formuojamos.

Antras bandymas yra pigesnis, nes nereikalinga laboratorinė įranga ir bandiniai. Šiuo atveju reikalinga tik kompiuterinė ir programinė įranga ir asmuo, gebantis teisingai naudotis simuliacijos programa. Modeliuojant smūgį į siją reikia turėti sijos plokščią arba erdvinį kompiuterinį modelį, nurodyti sijos medžiagą, įtvirtinimus, smūgio jėgos vietą ir dydį. Keičiant sijos kompiuterinio modelio geometriją, smūgio vietą ir / ar kryptį galima tikrinti, kaip sija reaguoja į įvairaus tipo smūgius. Tačiau šis bandymas taip pat turi ir trūkumų – kartais jis užtrunka kiek ilgiau nei realus bandymas, tačiau kartą sudėliojus modelį, bandymą galima kartoti begalę kartų, kuomet bandoma sukurti optimalią detalės konstrukciją. Taip pat, simuliacijos rezultatai nėra visai tikslūs, jie ne visai atitinka tai, kaip sija deformuojasi realios avarijos metu.

#### 2.4.1. Skersinės sijos bandymai

Skersinėje sijoje yra dvi sritys, kurios labiausiai nukenčia smūgio metu, tai smūgio sritis (angl. *Corner region*) (sritis, kurioje smūgio metu baigiasi kliūtis, t.y. nuo šios vietos likusi sijos dalis, kuri nepersidengia su kliūtimi, nepatiria tiesioginio kontakto su kliūtimi smūgio metu) ir sijos įtvirtinimo sritis (angl. *Assembly region*) (6 pav.).



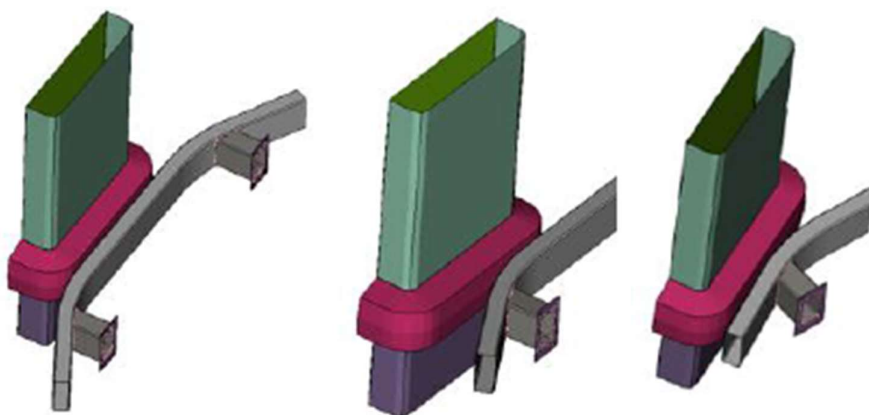
6 pav. Sijos kritinės sritys [11]

Optimizavus sijos skerspjūvį, Niyazi Tanlakas ir kiti autoriai [11] savo darbe pateikia aptariamų šešių sijos skerspjūvių bandymų rezultatus, gautus simuliacijos metu ir kaip sijos pakinta per 8 ms smūgio laikotarpį. Iš bendro deformuoto sijų vaizdo akivaizdu, kad visos sijos patiria didžiausias deformacijas sijos įtvirtinimo srityje – čia daugmaž visos jos yra stipriai deformuojamos ar net visai sutraiškamos. Tuo tarpu smūgio kritinė sritis labiausiai yra matoma tik kvadrato ir kupolo skerspjūvio sijose. Kitų skerspjūvių sijų bandymų rezultatai šioje srityje yra neblogi, tačiau nedidelė deformacija matoma visose. Kad geriau būtų pastebimas pokytis šiose srityse, straipsnio autoriai pateikia išsamius skerspjūvio vaizdus. Prieinama prie išvados, kad gaminti kvadrato ir kupolo skerspjūvio sijos yra nelogiška, nes parodyti patys blogiausi rezultatai abiejose kritinėse srityse.

Labai panašius tyrimus pateikia Indijos mokslininkas E.S. Roopeshas su bendraautoriumi [18]. Šiame darbe taip pat pateikiama skaičiavimams reikalinga metodika, tačiau tikrinama ne optimali

skerspjūvio forma, o koncentruojamasi į įtempimų pasiskirstymą sijoje esant skirtingoms medžiagoms. Taip pat svarbu paminėti, kad šiame darbe susitelkta į mažo greičio avarijas. Autoriai pasinaudoja baigtinių elementų metodu. Skirtumai yra akivaizdūs stebint kaip įtempimai pasiskirsto sijoje bei kada ji ima plastiškai deformuotis, atsižvelgiant į tai, iš kokios medžiagos sija yra pagaminta (tiriamos medžiagos – GMT, SMC bei aliuminis). Tai tik dar kartą patvirtina faktą, kad medžiagą rinktis reikia atsakingai. Autoriai priima išvadą, jog atsižvelgus į tamprumo modulį, takumo ribą ir atsirandančius įtempius smūgio metu, geriausia medžiaga tokios sijos gamybai – aliuminis. Toliau pateikiamos išvados: skersinės pusrėmio sijos tvirtumas gali būti pagerinamas pastorinus sijos sienelę arba pridodant papildomus komponentus, tokius kaip standumo briaunos (angl. *ribs*).

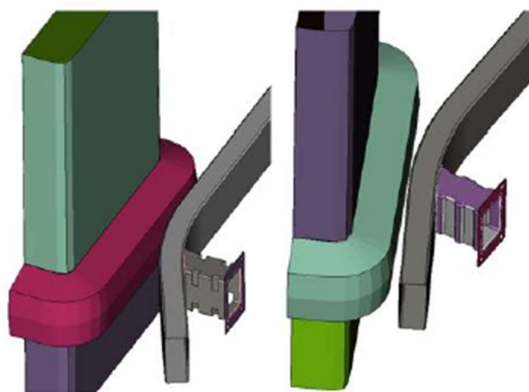
B. A. Constantinas ir kiti autoriai [15] savo darbe tiria, kaip smūgio metu deformuojasi dvi sistemos – modernioji (su energiją absorbuojančiais komponentais) ir klasikinė (be šių komponentų). Kompiuterinės simuliacijos būdu buvo ištirti trys smūgio į kliūtį metodai: centruotas smūgis, dalinio persidengimo smūgis, šoninis smūgis (7 pav.)



7 pav. Baigtinių elementų modelis, trys smūgių tipai [15]

Autoriai pasirinko maksimalią 5 % plastinę deformaciją ir pirma analizavo klasikinės (7 pav.) sistemos deformacijas. Bandymo rezultatai aiškūs – sijos apgadintos nepataisomai, jas tektų pakeisti naujomis. Didžiausios plastinės deformacijos yra būtent pačios sijos paviršiuje, o tvirtinimo elementai jų beveik nepatyrė, autorių pateiktose iliustracijose matomi vos keli pavieniai plastinių deformacijų taškai suvirinimo siūlių vietose.

Tokio pat tipo bandymai atlikti ir su modernia sistema (8 pav.). Autoriai pažymi, kad smūgio slopintuvai yra optimizuoti, juose suformuotos išpjovos, kad plastinės deformacijos prasidėtų ne sijoje, o smūgio slopintuvuose (8 pav.). Rezultatai su tokio tipo smūgio slopintuvais yra geresni nei klasikinės sistemos, tačiau plastinė deformacija vis viena viršija leistinas ribas.

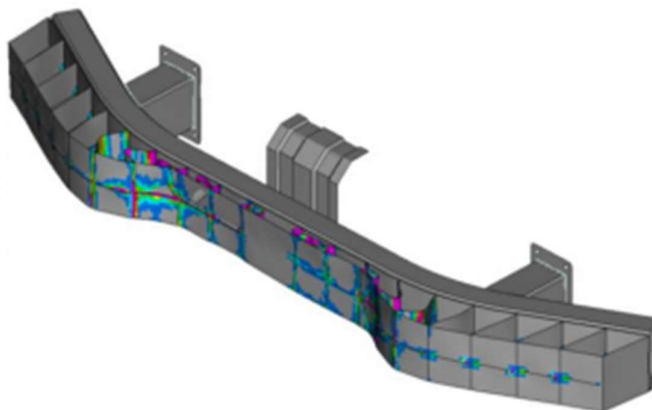


**8 pav.** Modernizuoti bamperio sijos smūgio slopintuvai [15]

Abu [15] straipsnyje aptarti bandymai parodo, jog deformacija yra patiriama tiek sijoje, tiek smūgio slopintuvuose ir tai jau yra skirtumas nuo prieš tai aptartos sistemos. Didžiausios plastinės deformacijos matomos smūgio slopintuvuose.

Centruoto smūgio bandymui tirta kiek kitokia smūgio sugėrimo konstrukcija. Šio smūgio bandyme matoma, kad visa plastinė deformacija patiriama papildomos apsaugos zonoje (9 pav.) Pačios sijos deformacija beveik nežiūrima.

Skirtumai tarp klasikinės ir modernios sistemų yra akivaizdūs. Tiesa, reikėtų įvertinti tai, koku greičiu vyksta susidūrimas. Esant mažiems greičiams, modernios sistemos plastines deformacijas turėtų patirti tik kartu su skersine sija montuojami smūgio slopintuvai.



**9 pav.** Ant skersinės pusrėmio sijos naudojama papildoma apsaugos zona [15]

#### **2.4.2. Pusrėmio skersinių sijų, kurių gamybai naudojamos skirtingos medžiagos, bandymai**

Teisingai parinkta medžiaga taip pat užima svarbų vaidmenį, būtent dėl to ne ką mažiau yra svarbūs ir skersinės sijos bandymai esant skirtingoms medžiagoms, iš kurių ši sija pagaminta. Tiriant medžiagas svarbios yra medžiagų mechaninės savybės, tokios kaip tamprumo modulis ir takumo riba. Būtent šias savybes savo darbe apžvelgia Kusekaras Sambhajis Kashinathas ir kiti autoriai [16], tyrimą atlikę kompiuterinio modeliavimo būdu. Autoriai pasirinko apžvelgti tris medžiagas, iš kurių

neretai gaminamos skersinės sijos – plienas (konstrukcinis plienas), aliuminis (3105-H18) bei magnis (AZ31B). Magnio standumas yra didesnis nei plieno, o plieno standumas yra didesnis nei aliuminio. Visais bandymų atvejais, modelio charakteristikos nekito, kito tik pačios sijos medžiaga. Medžiagų mechaninės savybės autorių pateikiamos dar prieš atliekant bandymus, kad būtų akivaizdžiai matomas skirtumas tarp tiriamųjų medžiagų. Tam, kad būtų galima ištirti tamprumo modulio įtaką, buvo pasirinkti trys minėti lydiniai, turintys skirtingą tamprumo modulį, tačiau taip pat jie turi labai panašią takumo ribą. Bandymo eiga – švytuoklė smogia į buferį statmenai 4 km/h greičiu. Palyginus sijų iš skirtingų metalų kinetinės energijos perdavimą aiškiai pastebima, kad skiriasi magnio, plieno ir aliuminio skersinių sijų greitis po smūgio. Aliuminio skersinės sijos skirtumas tarp kliūties greičio ir transporto priemonės greičio po smūgio yra didesnis nei plieno ir magnio sijose. Kitaip tariant, aliuminio sijoje daugiau kinetinės energijos iš kliūties perduodama į transporto priemonę. Tai reiškia, kad plieninėse ir magnio sijose kliūties greičio sumažėjimas ir transporto priemonės greičio padidėjimas yra mažesnis nei sijoje pagamintoje iš aliuminio. Kitais žodžiais tariant, naudojant iš aliuminio pagamintą siją daugiau smūgio kinetinės energijos perduodama automobiliui. Kitas tyrimo parametras buvo smūgio jėga. Norint palyginti skirtumus tarp smūgio jėgų, stebima švytuoklės inercijos jėga ir stebima kaip švytuoklė sulėtėja dėl bendro skersinės sijos ir automobilio poveikio. Smūgio jėga aliuminio skersinėje sijoje yra mažiausia, tačiau ji veikia ilgesnį laiko tarpą. Šis reiškinys atsiranda dėl mažesnio aliuminio standumo.

Antra [16] darbo autorių tiriamą savybę – takumo riba. Takumo ribos įtaka tiriamą pasitelkus tris skirtingus aliuminio lydinius, turinčius skirtingas mechanines savybes. Straipsnyje pasirenkami lydiniai: 3105-H18, 2219-T31 ir 2024-T86. Kartu su didėjančiu aliuminio takumu didėja ir maksimalūs įlinkiai bei liekamosios plastinės deformacijos po smūgio. Taip pat gana anksti grafikuose pastebimas ir suirimo taškas, ir maksimalūs sijos įlinkiai. Visi šie reiškiniai siejami su aliuminio takumo riba. Esant skirtingų klasių aliuminio skersinėms sijoms, skirtumas tarp greičių po smūgio didėja, didėjant takumo ribai. Kadangi daugiau kinetinės energijos yra perduodama automobiliui, dėl to mažiau energijos išsisklaido.

Trečias, tačiau ne ką mažiau svarbus [16] darbe pasirinktas tyrimui veiksnys – sijos profilio sienelės storis. Šiam tyrimui autoriai pasirinko tirti keturių skirtingų storių skersines sijas, pagamintas iš labai tvirto plieno EG-HF80Y100T kurio takumo riba yra 584 MPa. Bandiniai parenkami 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm storio. Gauta, kad didžiausi įlinkiai didėja mažėjant buferio standumui, o tai vyksta mažėjant skersinės sijos storiui. Kuo storesnė sija bandoma, tuo suirimo taškas (angl. *separation point*) ir didžiausias deformacijos taškas grafike atitolinami. Įvairių storių skersinės sijos smūgio jėgų tyrimas rodo, kad smūgio jėga didėja padidinus skersinės sijos storį. Didėjant sijos storiui, daugiau kinetinės energijos perduodama iš kliūties į transporto priemonę ir mažiau sijos plastinės deformacijos energijos [16]. Apibendrinant šį tyrimą, galima teigti, kad projektuojant siją labai svarbu atkreipti dėmesį ir į teisingą medžiagos parinkimą, medžiagos, iš kurio gaminama sija, storį. Net esant optimalios formos skerspjūviui, sija gali būti ne tokia veiksminga, jei parenkant medžiagas nebus per daug gilinamasi ir nebus ieškoma labiausiai tinkamo pritaikyti varianto.

### **2.4.3. Pusrėmio skersinės sijos smūgio energijos sugeriamumo bandymai**

Metalo storio įtaka sijos deformacijoms smūgio metu taip pat domina ir kitus tyrėjus [19]. Čia autoriai pasinaudoję kompiuterinės simuliacijos būdu ištyrė bei palygino trijų skirtingų storių sijas: 4 mm, 4,5 mm bei 5 mm. Kaip ir buvo galima tikėtis, kuo storesnis metalas, tuo gaunami geresni bandymo

rezultatai. Darbe autoriai taip pat pamini, kad projektuojant automobilio komponentus privaloma laikytis standartų ir komponentai turi atitikti tam tikrus transporto priemonių saugumo reikalavimus.

Gan panašiai medžiagas apžvelgia kiti tyrėjai moksliniame darbe [17]. Šiame darbe plačiau apžvelgiami kiek kitokie sijos modeliai – vadinamasis korys ir putplastis naudojamas kartu su skersine sija, kad būtų pagerinamos energijos sugėrimo savybės. Korio struktūros plačiai naudojamos įvairiose pramonės srityse dėl jų puikių fizinių ir mechaninių savybių, tokių kaip didelio stiprumo ir svorio santykio, mažo masės ir tūrio santykio ir didelio energijos sugėrimo pajėgumo. Autoriai pasinaudoja baigtinių elementų metodu ir tiria minėtas sijų struktūras, jos taip pat yra lyginamos su jau esama skersine sija. Autoriai pateikia skaičiavimus, kurie rodo, kad skersinėje sijoje su korio struktūra energijos sugėrimo pajėgumas yra 11,26 % didesnis, palyginti su esama plienine bamperio sija. Tuo tarpu sijos su putplasčio elementais rezultatai parodė 6 % geresnius smūgio sugeriamumo rodiklius palyginant su plieninėmis sijomis.

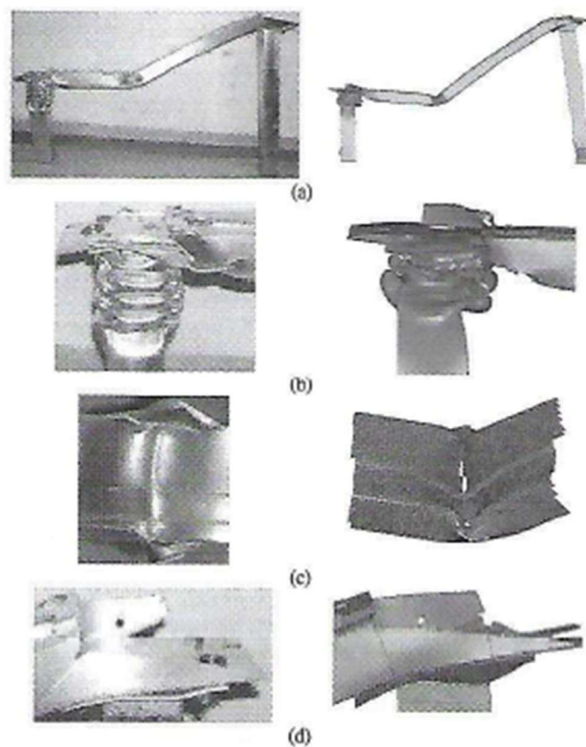
Korio sluoksniuotoji konstrukcija kitų autorių [3] taip pat palyginama su įprasta plieno bei aliuminio sija. Atlikę trumpą tyrimą autoriai prieina išvadą, kad korio konstrukcija savo rezultatais nenusileidžia sijai gaminamai iš plieno, nors yra pigesnė. Tokios konstrukcijos minusas yra tas, kad ji užima nemažai vietos.

Energijos sugėrimo temą, keičiant tam tikrus sijos parametrus, paliečia ir daugiau tyrėjų [21]. Kaip ir keliuose anksčiau apžvelgtuose darbuose, taip ir čia autoriai teigia, kad yra keli būdai, kaip galima ištirti energijos sugeriamumą avarijos metu: skaičiavimai pasinaudojus smūgio teorija, fiziniai bandymai atliekami realiu laiku bei, autorių teigimu, automobilių industrijoje populiariausias metodas – baigtinių elementų metodas (angl. *Finite Element Analysis – FEA*). Autoriai apžvelgia kokiais programinės įrangos paketais galima atlikti tokio tipo analizes. Darbe taip pat apžvelgiamos sijos modifikavimo galimybės, dėl kurių energija būtų efektyviau sugerama. Apžvelgiama sijos medžiagos parinkimo, medžiagos storio, sijos formos bei standumo briaunų įtaka energijos sugėrimui.

Kiek kitokio tipo bandymą atliko C. R. Sonawanas ir A. L. Shelaris [20]. Šiame darbe kompiuterinį modelį sudaro ne konkreti detalė, o visas automobilis. Bandymas yra kitoks tuo, kad stebimos ne tik liekamosios deformacijos sijoje, tačiau atkreipiamas dėmesys į tai, kokius apgadinimus gali patirti kitos transporto priemonės dalys, tokios kaip radiatorius. Autoriai atlieka keturis skaitinius bandymus, kuriuose yra keičiamas sijos storis, forma ar abu šie parametrai kartu. Rezultatai parodo, kaip keičiasi sugeriamos energijos kiekiai besikeičiant sijai.

Savo bandymo versija pateikia mokslininkai iš Norvegijos [12]. Eksperimento metu buvo tiriami trys skirtingo stiprumo lydiniai (penki aukšto stiprumo lydinio bandiniai ir po tris bandinius vidutinio bei žemo stiprumo lydinių), po to šis bandymas atliekamas kompiuterinės simuliacijos metodu. Eksperimentiniam bandymui atlikti autoriai naudojami SIMLab smūgiavimo aparatu, pats bandymas buvo fiksuojamas greitaėge vaizdo kamera. Kompiuterinei simuliacijai autoriai naudoja LS-DYNA programinį paketą. Bandymui pasirinktas 40 % persidengimas, bandymo sąlygos panašios kaip ir 1 pav. dešinėje pavaizduotame susidūrimo bandyme, t.y. kliūtis persidengia su 40 % tiriamo komponento pločio. Bandymo rezultatai, gauti realaus bandymo metu ir simuliacijos pagalba, palyginami tarpusavyje (10 pav.). Iš šių rezultatų autoriai prieina išvadą, kad nors ir yra šiokių tokių netikslumų simuliacijos maksimalios jėgos grafikuose, tačiau šis metodas patikimas ir jo rezultatai artimi realaus bandymo rezultatams.





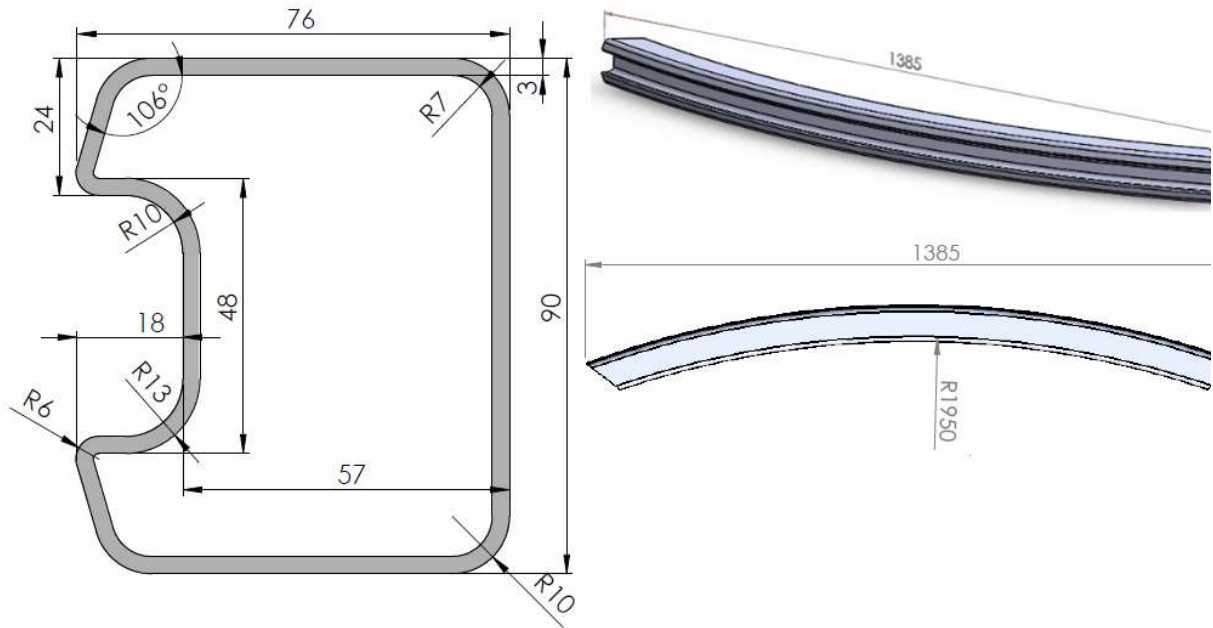
**10 pav.** Simuliacijos ir realaus bandymo rezultatų palyginimas [12]

Skersinės sijos tyrimus kiek kitu kampu atlieka ir tyrėjai iš Lietuvos [22]. Savo darbe jie tiria kaip skersinės pusrėmio sijos „elgsena“ keičiasi po jos remonto, t.y. jei automobilis jau kartą yra patyręs apgadinius, sija buvo deformuota, tačiau remonto metu jos geometrija atstatyta į pradinę padėtį. Tikslui pasiekti tyrėjai eksperimentiškai atlieka bandymą: pirmu bandymo etapu sija yra įstatoma į stendą ir lenkiama kol yra pasiekiamas 75 mm įlinkis. Antru bandymo etapu sijos geometrija yra atstatoma ir bandymas yra kartojamas. Iš pateiktųjų rezultatų matomas pokytis tarp sveikos sijos apkrovos iki maksimalios užsiduodamos deformacijos, bei sijos, kuri jau yra patyrusi deformacijas ir buvo remontuojama ir atstatyta į pradinę padėtį. Autoriai prieina išvadą, kad realiame eisme naudoti remontuotą skersinę siją gali būti pavojinga – šios sijos stiprumas po jos ištiesinimo sumažėja 26-29 %. Taip pat pastebima, kad antrą kartą deformuojantis sijai ji paprasčiausiai suyra – atsiranda įtrūkimai bei plyšiai.



### 3. Skersinės sijos 3D modelis ir uždavinio modeliavimas

Tyrimui atlikti pasirinkta skersinė pusrėmio sija naudojama automobiliuose Volkswagen Passat B5. Sijos skerspjūvis bei 3D modelis pateiktas 11 pav.

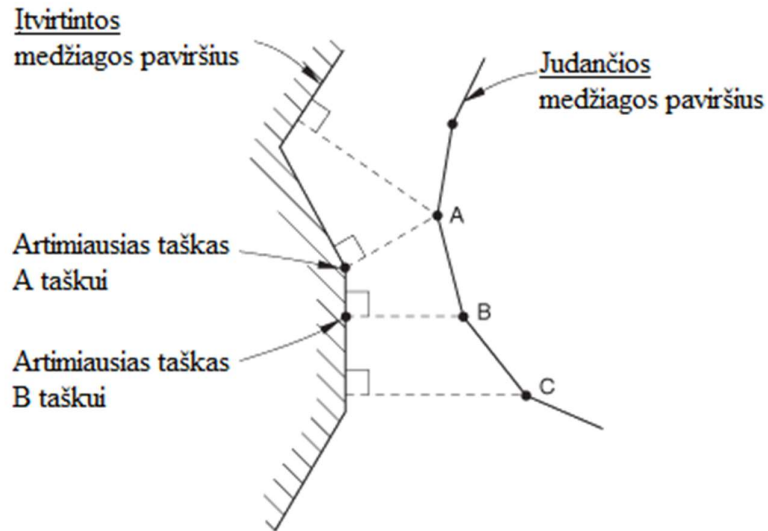


11 pav. Automobilio Volkswagen Passat B5 skersinės pusrėmio sijos skerspjūvis (kairėje), sijos lenkimo spindulys ir 3D modelis (dešinėje)

Sijos „elgsena“ smūgio metu bus nustatoma naudojant *SolidWorks Simulation*. Bus sprendžiamas kontaktinis netiesinis dinaminis uždavinys (angl. *nonlinear-dynamic*) darant sekančias prielaidas:

- nevertinama trintis tarp kūnų paviršių;
- aplinkos temperatūra – 20 °C;
- oro pasipriešinimas – nevertinamas;
- kontakto tipas – paviršius-taškas. Tai toks kontakto tipas, kuomet sąlyčio sąlygos nustatomos pasinaudojant taškų projekcijomis. Viena sąlyčio sąlyga apima vieną judančios medžiagos tašką ir šalia esančių įtvirtintos medžiagos taškų grupę, iš kurios vertės yra interpoliuojamos į projekcijos tašką (12 pav.) Šie taškai sąveikauja tarpusavyje [26];
- smūgis slopinamas, slopinimo matrica  $[C] = 0,2 [M]$ ; čia  $[M]$  – baigtinių elementų modelio masių matrica.

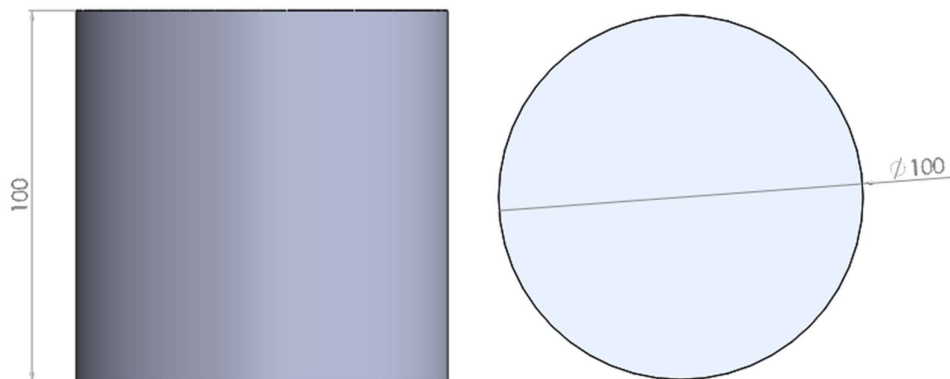
Kad būtų paprastesnis modelis ir į jį nereikėtų papildomai įtraukti automobilio komponentų turinčių įtakos sijos kraštinėms sąlygoms, pasirenkamas „atvirkštinis“ uždavinys – juda kliūtis, o ne automobilis.



12 pav. Paviršius-taškas kontakto veikimo principas [26]

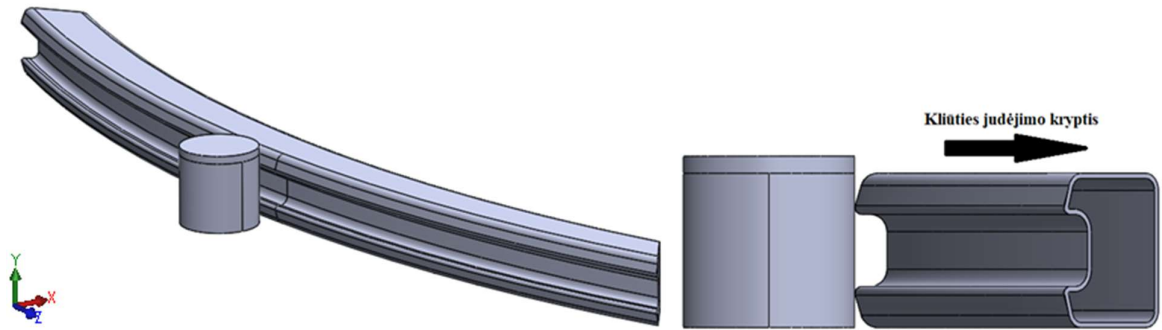
### 3.1. Skaitinio uždavinio *Solidworks Simulation* aplinkai modeliavimas

Tyrimui pasirinkta kliūtis – 100 mm aukščio ir 100 mm skersmens pilnaviduris ritinys (13 pav.).



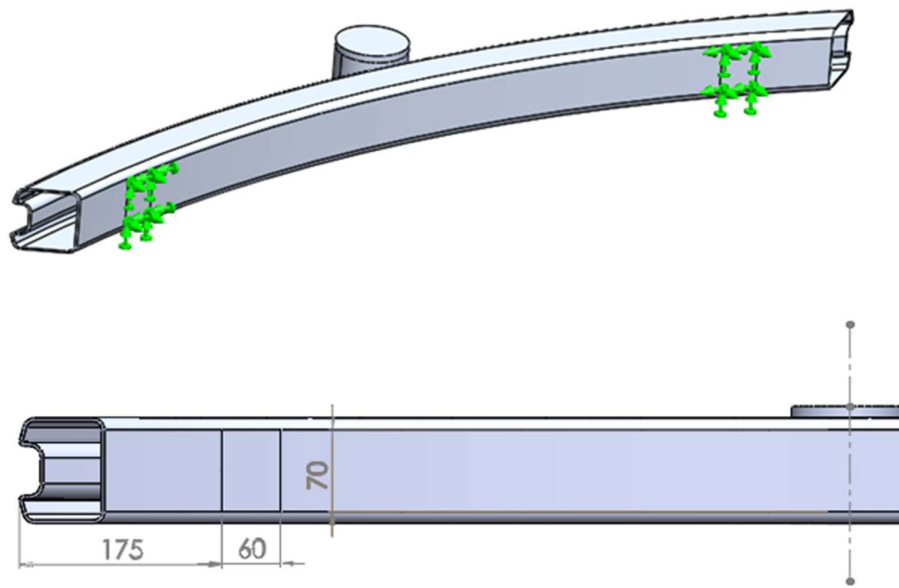
13 pav. Tyrimui parinkta kliūtis

Visų bandymų metu tyrimo sąlygos tos pačios: pasirinktu greičiu kliūtis juda X ašies kryptimi sijos link, skaičiavimai pradedami nuo to momento, kuomet kliūtis ir sija susiliečia. Kliūtis juda laisvai X ašies atžvilgiu, tačiau judėjimas Y ir Z ašyse yra suvaržytas. Smūgis yra centrinis (14 pav.).



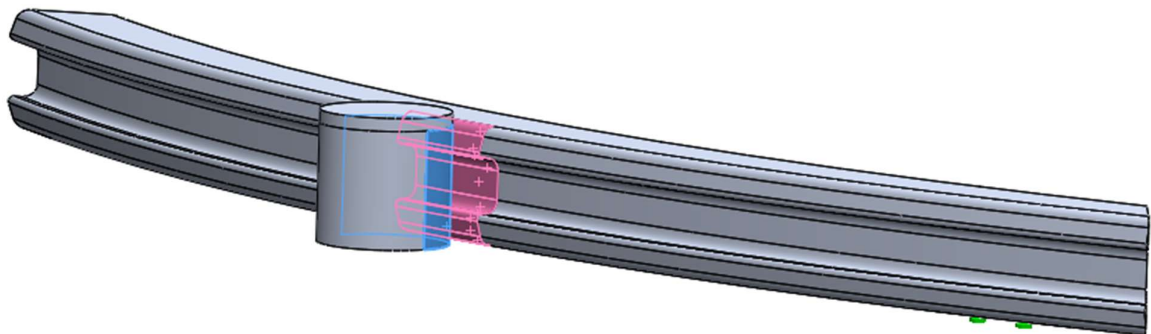
14 pav. Kliūtis smūgio į siją modelis

Modeliuojant smūgį numatoma, kad sija yra įtvirtinama ties išilginių sijų (lonžeronų) tvirtinimo vietomis. Įtvirtinimo zona yra 175 mm nuo sijos kraštų, 60 mm pločio ir 70 mm aukščio (15 pav.).



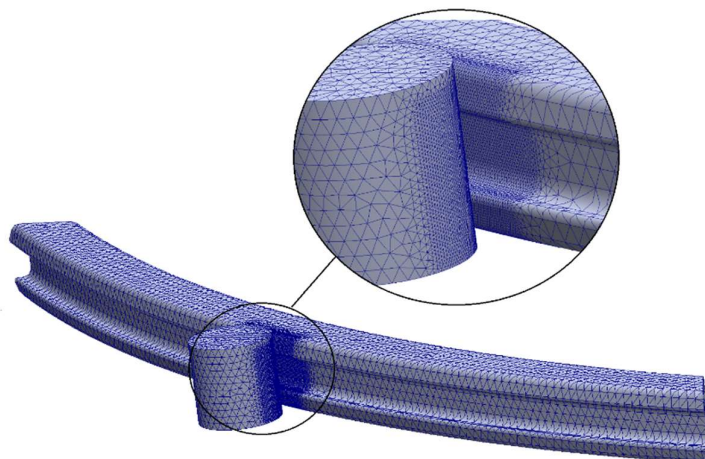
15 pav. Sijos įtvirtinimo vietos

Modelyje laikoma, kad tarpusavyje gali kontaktuoti tik paviršiai, kurie paryškinti 16 pav.



16 pav. Smūgio metu sijos ir ritinio kontaktuojantys paviršiai

Naudotas baigtinių elementų modelio tinkelis pateiktas 17 pav.



17 pav. Baigtinių elementų tinkelio tankis

Sijų medžiagų mechaninės savybės pateiktos 1 lentelėje.

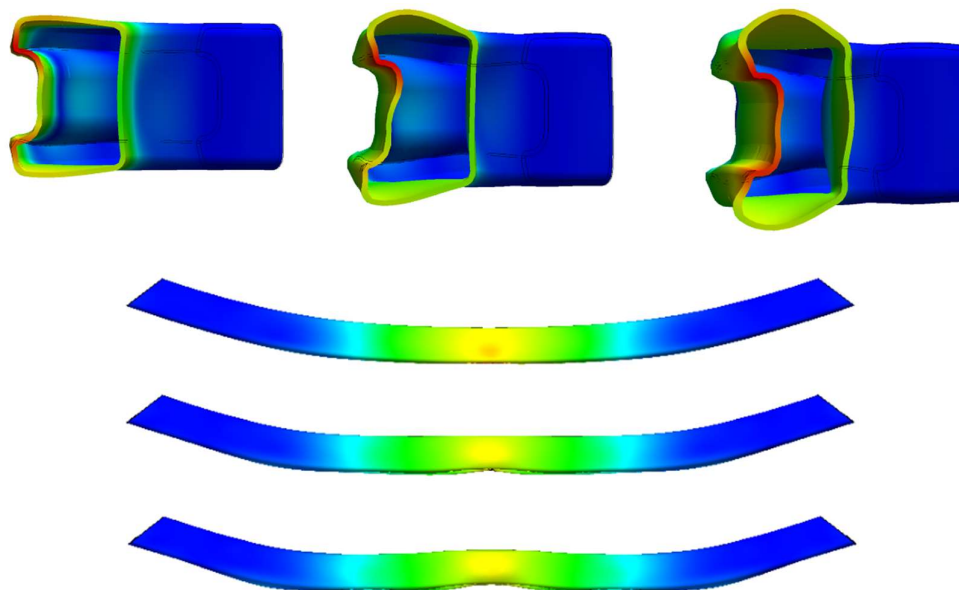
1 lentelė. Tiriamų medžiagų mechaninės savybės [23-25]

Savybės Medžiaga	Tamprumo modulis, GPa	Puasono koeficientas	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	Stiprumo riba tempiant, MPa	Takumo riba, MPa
ALU 3105	70	0,33	2710	150	130
X5CrNi 18-10	200	0,28	7800	610-900	220
S355N	190	0,29	7800	550	370

#### 4. Skersinės sijos deformacijų ir įtempimų, kylančių centrinio smūgio metu, tyrimai

##### 4.1. Sijos gamybai naudojamos medžiagos įtaka

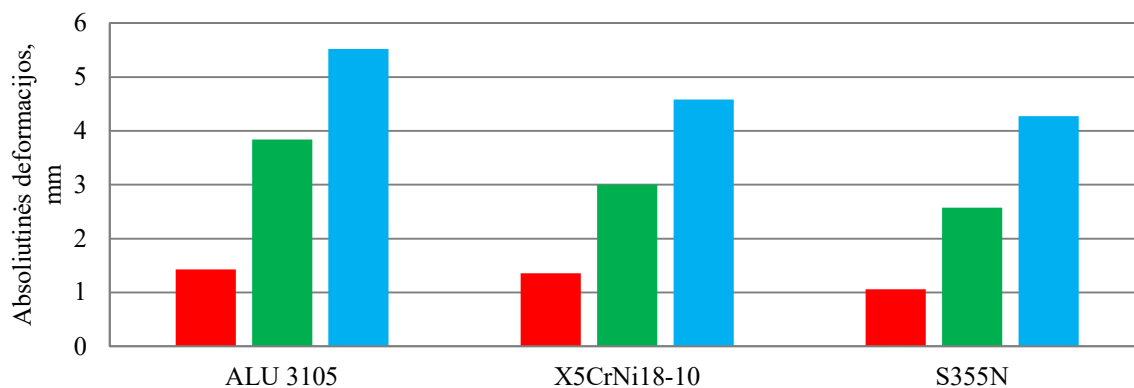
Kaip sija deformuojasi ir kaip vizualiai pakinta po smūgio skirtingu greičiu matyti iš 18 pav.



**18 pav.** Vizualiniai pokyčiai 3mm sijose po smūgio visais tiriamais greičiais: viršuje – sijos skerspjūviai (mastelis 1:10), apačioje – sijos vaizdas iš viršaus

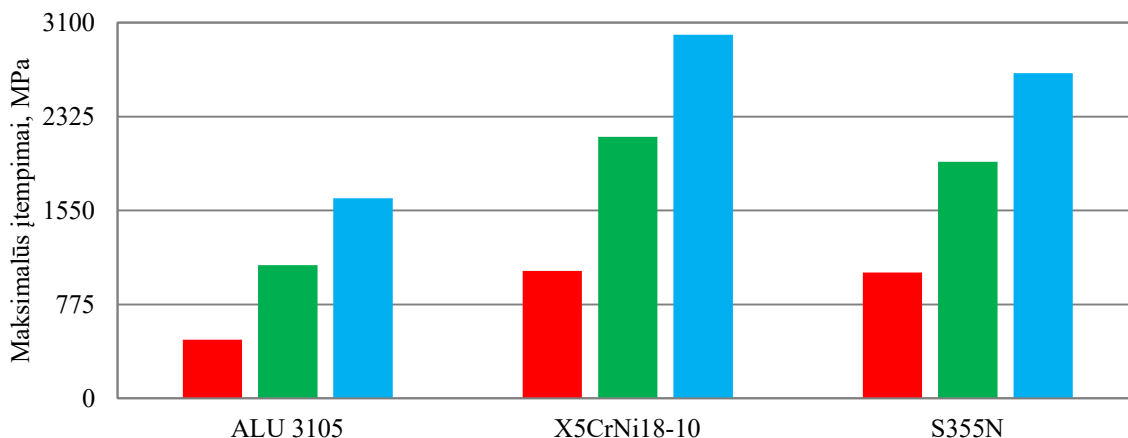
Iš pateikto pavyzdžio puikiai matyti kaip sija „priima“ smūgį. Matoma, kad sija labiausiai yra deformuojama toje vietoje, kurioje yra patiriamas smūgis. Tolstant nuo smūgio vietos – deformacijos mažėja.

Atlikus stipruminius skaičiavimus gaunami absoliutinių deformacijų bei įtempimų rezultatai pateikiami žemiau (19-20 pav.). Pateikiamos maksimalios smūgio metu gaunamos deformacijų ir įtempimų reikšmės.



**19 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų smūgio vietoje priklausomybė nuo medžiagos, iš kurios pagaminta sija, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Didžiausias deformacijas patiria sija pagaminta iš ALU 3105 lydinio, tuo tarpu mažiausias deformacijas patiria sija pagaminta iš S355N plieno. Plieno X5CrNi18-10 sijoje po smūgio atsiradusios deformacijos yra vidutiniškai 20,62 % mažesnės, nei sijoje pagamintoje naudojant ALU 3105 lydinį, tačiau vidutiniškai 13,10 % didesnės nei sijoje, kurios gamyboje naudojama medžiaga yra S355N. Struktūrinio plieno S355N sijoje po smūgio atsiradusios deformacijos yra 36,44 % mažesnės nei ALU 3105 lydinio sijoje.



**20 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo medžiagos, iš kurios pagaminta sija, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

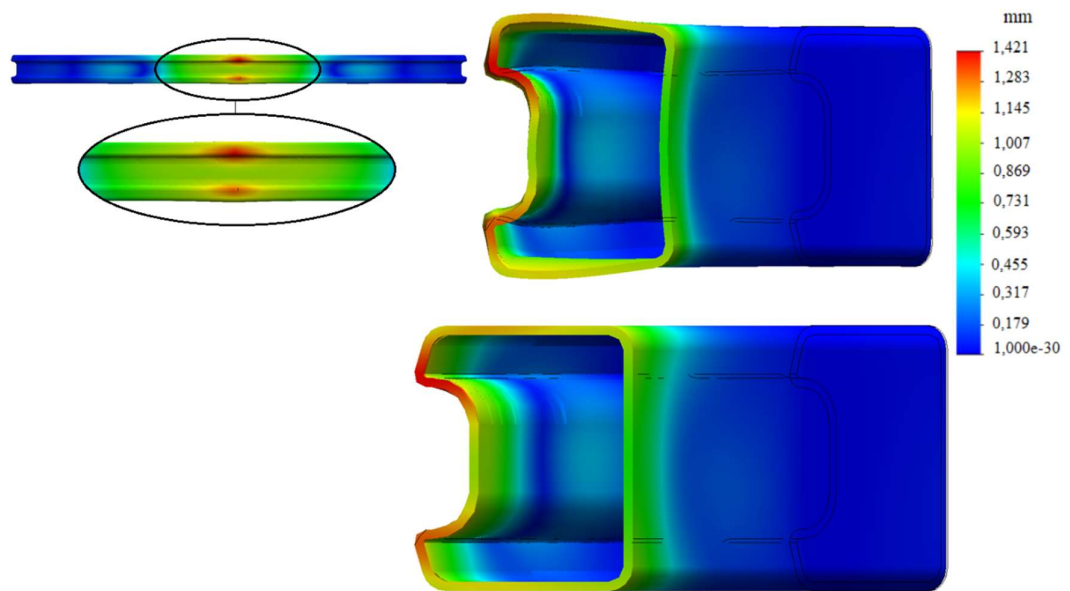
Smūgio metu atsirandančių įtempimų sijosose stulpelinės diagramos rodmenys išsidėsto kiek kitaip nei šiek tiek aukščiau atvaizduotos deformacijos. Iš 20 pav. matoma, kad mažiausi įtempimai yra sijoje pagamintoje iš ALU 3105 lydinio, tuo tarpu nerūdijančio plieno X5CrNi18-10 sijoje atsirandantys įtempimai yra didžiausi iš skaičiavimams pasirinktų medžiagų. Iš 20 pav. aiškiai matoma, kad įtempimai sijoje viršija tiek takumo tiek stiprumo ribas. Skaičiavimu metu nuspręsta skaitinį bandymą tęsti, net atsiradus medžiagos suirimo požymiams.

ALU 3105 lydinio sijoje smūgio metu atsirandantys įtempimai yra vidutiniškai 91,88 % mažesni, nei X5CrNi18-10 plieno sijoje ir 75,35 % mažesni nei S355N plieno sijoje. Plieno S355N sijoje atsirandantys įtempimai yra vidutiniškai 9,43 % mažesni, nei X5CrNi18-10 plieno sijoje.

Vertinant medžiagų takumo ir stiprumo ribas (1 lentelė) matoma, kuomet greitis smūgio metu yra 15 m/s lydinio ALU 3105 sijoje atsirandantys įtempimai stiprumo ribą viršija net 11 kartų, o takumo ribą 12,7 karto. Esant toms pačioms sąlygoms plieno X5CrNi18-10 sijoje atsirandantys įtempimai stiprumo ribą viršija 3,33 karto, o takumo ribą – 13,65 karto. Plieno S355N stiprumo riba yra viršijama 4,88 karto, takumo – 7,25 karto. Tai reiškia, kad tokio smūgio metu medžiaga suyra – detalė yra visiškai sugadinama.

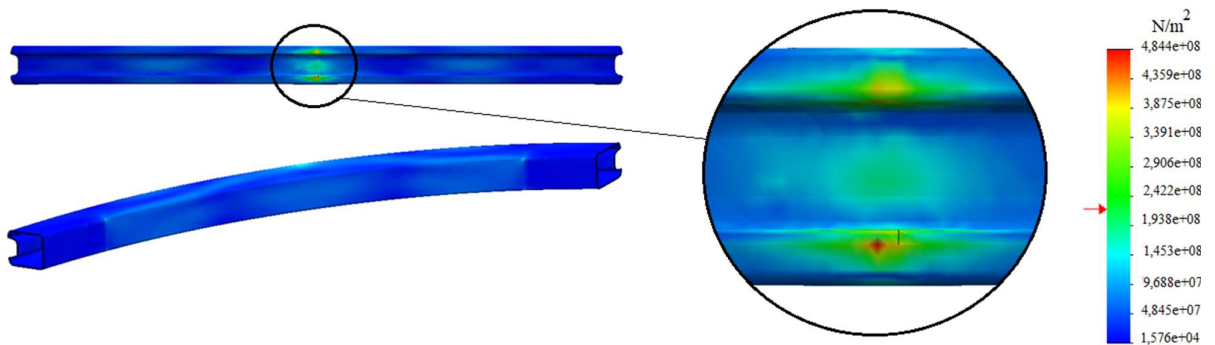
#### 4.2. Sijos sienelės storio ir gamybai naudojamos medžiagos įtaka

Sijos deformacijų bei įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio tiriama visose trijose, anksčiau ištirtose, iš skirtingų metalų pagamintose sijosose. Iš 21 pav. pateiktų vaizdų matomos sijos deformacijos, kurias sija patiria esant smūgiui, kuomet kliūtis juda 4 m/s greičiu. Didžiausios deformacijos pastebimos sijos viduryje – ten, kur kliūtis kontaktuoja su sija. Tolyne nuo smūgio kontakto vietos deformacijos palaipsniui mažėja.



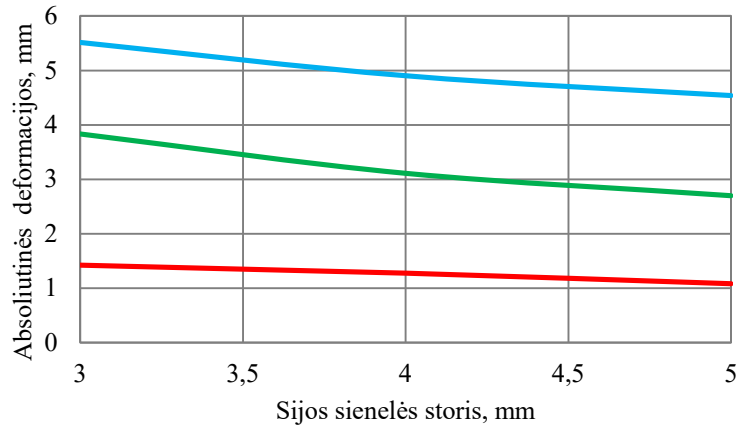
**21 pav.** Deformacijų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 3 mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 4 m/s, pjūvio (dešinėje) mastelis 1:10, apačioje – nedeformuotos sijos pjūvis

Įtempimų pasiskirstymas sijoje po smūgio pavaizduotas 22 pav. Įtempimai, kaip ir deformacijos, didžiausias reikšmes pasiekia toje vietoje, kur smūgio metu kliūtis kontaktuoja su sija. Vaizde iš sijos galo, stebint įtempimus, puikiai matomos įtvirtinimo vietos – nuo sijos kraštų iki įtvirtinimų įtempimų susidarymas nepastebimas.



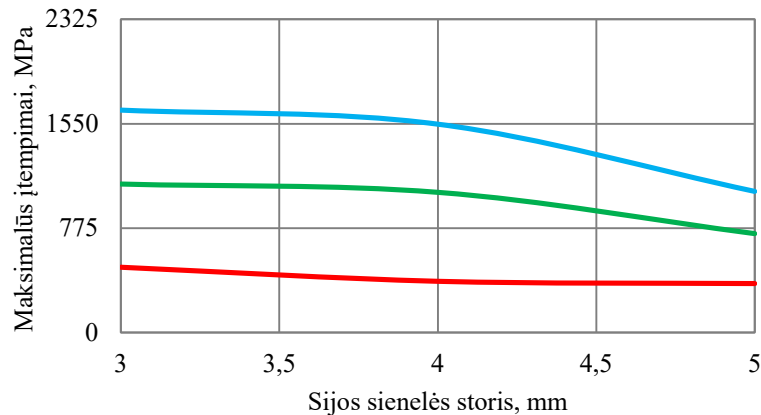
**22 pav.** Įtempimų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 3 mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 4 m/s

Sijų įtempimų ir deformacijų kitimą, kintant sijos sienelės storiui, matome žemiau pateiktuose grafikuose (23-28 pav.).



**23 pav.** Sijos pagamintos iš ALU 3105 lydinio absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

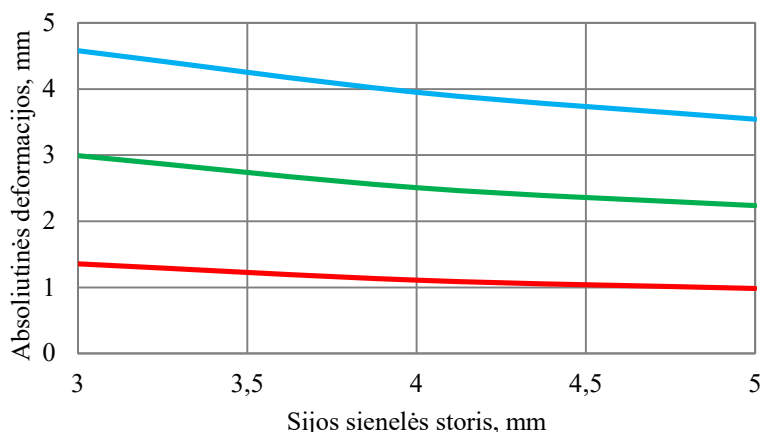
Iš 23 pav. pavaizduoto grafiko matyti, kad didėjant sienelės storiui palaipsniui mažėja ir sijoje po smūgio atsirandančios deformacijos. Pastorinus sijos sienelę iš 3 mm į 4 mm, deformacijos vidutiniškai sumažėjo 15,96 %, sienelės storį pakeitus iš 4 mm į 5 mm, deformacijos vidutiniškai sumažėja 11,77 %. Sienelę pastorinus iš 3 mm į 5 mm, deformacijos po smūgio sumažėja 29,6 %.



**24 pav.** Sijos pagamintos iš ALU 3105 lydinio maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

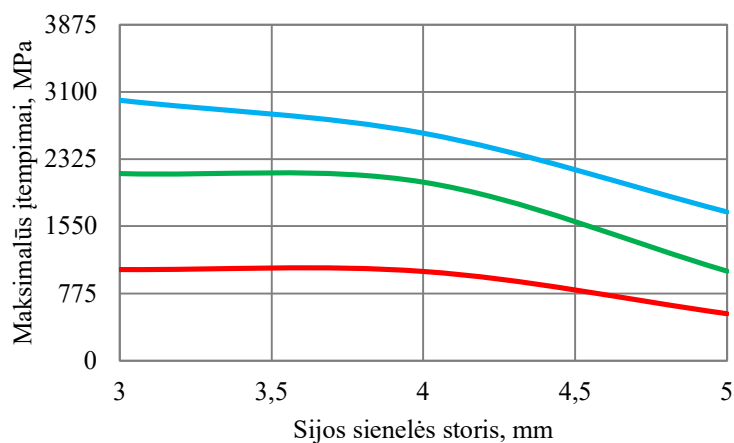
Maksimalūs įtempimai po smūgio sijoje didinant sienelės storį, kaip ir deformacijos – mažėja. Padidinus sijos sienelės storį iš 3 mm į 4 mm įtempimai vidutiniškai sumažėja 8,99 %, tuo tarpu sijos sienelės storį padidinus iš 4 mm į 5 mm įtempimai vidutiniškai sumažėja 38,32 %. Pakeitus sijos sienelės storį iš 3 mm į 5 mm įtempimai vidutiniškai sumažėja 50,75 %. Iš 24 pav. vaizduojamo grafiko matyti, kad esant 10 m/s ir 15 m/s greičiams smūgio metu, įtempimai ženkliai sumažėja sienelės storį pakeitus iš 4 mm į 5 mm, o tuo tarpu esant 4 m/s greičiui smūgio metu įtempimų mažėjimas didėjant sienelės storiui nėra toks akivaizdus.





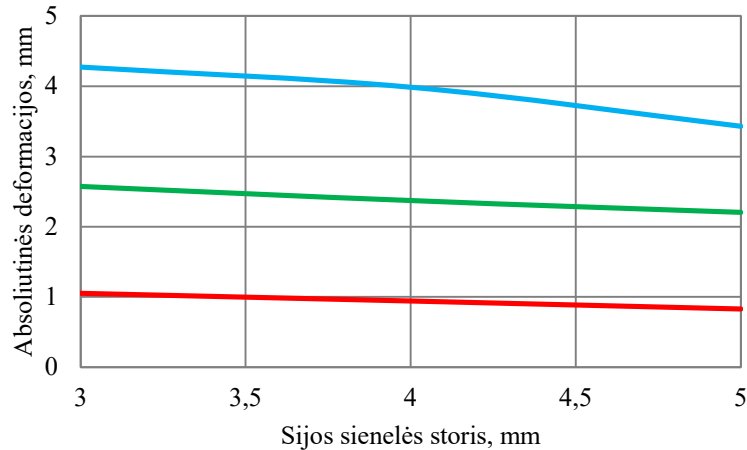
**25 pav.** Sijos pagamintos iš X5CrNi10-18 plieno absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo kliūtis sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Kaip ir ALU 3105 lydinio grafike, kaip ir nerūdijančio plieno X5CrNi18-10 absoliutinių deformacijų grafike (25 pav.) kreivės brėžiamos panašiai, nors deformacijos iš šio plieno pagamintoje sijoje yra mažesnės. Šiuo atveju sijos sienelės storį padidinus iš 3 mm į 4 mm sijos deformacijos vidutiniškai sumažėja 18,14 %, o padidinus iš 4 mm į 5 mm – 12 %. 5 mm sienelės storio sijoje atsiradusios deformacijos yra vidutiniškai 32,31 % mažesnės nei 3 mm sienelės storio sijoje.



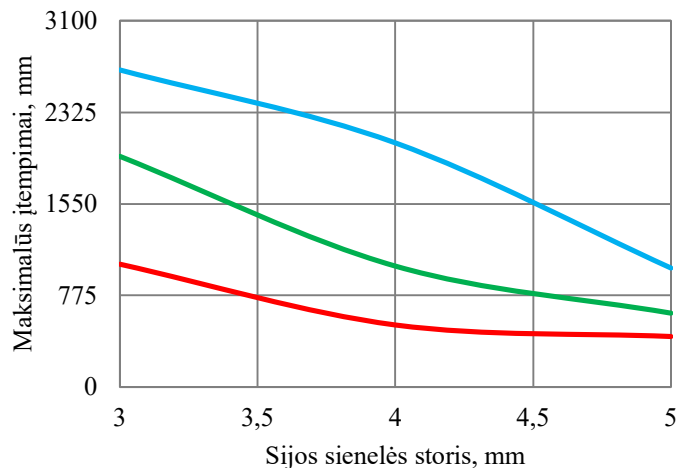
**26 pav.** Sijos pagamintos iš X5CrNi10-18 plieno maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Maksimalūs įtempimai susidarę smūgio metu nerūdijančio plieno X5CrNi18-10 sijoje visais tirtais greičiais kinta daugmaž vienodai – matomas nedidelis maksimalių įtempimų mažėjimas sija pastorinus iš 3 mm į 4 mm, tačiau sijos sienelę pastorinus iš 4 mm į 5 mm pastebimas aiškus maksimalių įtempimų sumažėjimas (26 pav.). Iš gautų skaičiavimų rezultatų matoma, kad sija pastorinus iš 3 mm į 4 mm sijoje smūgio metu atsirandantys maksimalūs įtempimai yra 8,72 % mažesni. Sijos storiui pasikeitus iš 4 mm į 5 mm maksimalūs įtempimai sijoje sumažėja 73,47 %, o 3 mm sienelės storio sija pastorinus iki 5 mm sijos maksimalūs įtempimai sumažėja 88,6 %.



**27 pav.** Sijos pagamintos iš S355N plieno absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Absoliutinių deformacijų kitimo grafikas (27 pav.) keičiant sienelės storį sijoje, pagamintoje iš struktūrinio plieno S355N, yra panašus į aukščiau pateiktus grafikus kuriuose vaizduojamos deformacijos kitų metalų sijose (23 pav., 25 pav.), tačiau šių skaičiavimu metu gauti rezultatai ir pavaizduotos deformacijos ir yra mažesnės nei prieš tai aprašytuose variantuose. Plieno S355N sijos sienelės storį padidinus iš 3 mm į 4 mm sijoje atsirandančios maksimalios deformacijos po smūgio vidutiniškai sumažėja 8,31 %, o sienelės storį padidinus iš 4 mm į 5 mm šios deformacijos sumažėja dar 12,6 %. Sijos sienelės storiui padidėjus iš 3 mm į 5 mm maksimalios deformacijos po smūgio sumažėja 21,96 %.



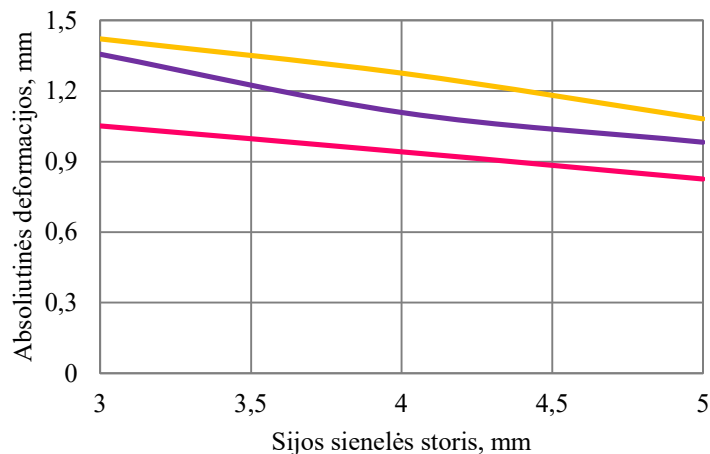
**28 pav.** Sijos pagamintos iš S355N plieno maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Nors absoliutinių deformacijų kitimas, priklausomai nuo sijos sienelės storio, pateiktuose grafikuose lyginant visas tris medžiagas yra daugmaž vienodas, tačiau sijos gaminamos iš plieno S355N maksimalių įtempimų grafike (28 pav.) pastebimas kiek kitoks dėsningumas nei prieš tai tirtose

medžiagose. Nors iš grafiko galima padaryti tokią pat išvadą, kaip ir iš aukščiau aptartų – kuo didesnis sijos sienelės storis, tuo smūgio metu sijoje atsirandantys maksimalūs įtempimai yra mažesni. Tačiau kreivių vaizdavimas skiriasi tuo, kad didesnis įtempimų mažėjimas pastebimas sijos sienelės storį padidinus iš 3 mm į 4 mm, o storiui pasikeitus iš 4 mm į 5 mm įtempimai mažėja ne taip akivaizdžiai – kreivė plokštėja. Tik greičiui smūgio metu esant 15 m/s įtempimų mažėjimo kreivė yra panaši į aukščiau esančių grafikų kreives – didesnis maksimalių įtempimų sumažėjimas pastebimas sijos sienelės storį padidinus iš 4 mm į 5 mm. Šių skaičiavimų rezultatuose matoma, kad pakeitus sijos sienelės storį iš 3 mm į 4 mm maksimalūs įtempimai sijoje po smūgio vidutiniškai sumažėjo 57,05 %, o sijos sienelės storiui padidėjus iš 4 mm į 5 mm įtempimai vidutiniškai sumažėja 75,42 %. Sijos sienelės storiui padidėjus iš 3 mm į 5 mm maksimalūs įtempimai vidutiniškai sumažėja 175,51 %.

Visų trijų metalų tiek absoliutinių deformacijų, tiek maksimalių įtempimų grafikai yra daugmaž panašūs – kuo didesnis sijos sienelės storis, tuo pastebimos mažesnės maksimalios deformacijos sijoje po smūgio ir tuo pačių pastebimi mažesni maksimalūs įtempimai. Didžiausias įtempimų sumažėjimas pastebėtas padidinus struktūrinio plieno S355N sijos sienelės storį iš 3 mm į 5 mm – 175,51 % mažesni įtempimai. Didžiausias deformacijų sumažėjimas pastebėtas nerūdijančio plieno X5CrNi18-10 sijoje, sienelės storį pakeitus iš 3 mm į 5 mm absoliutinės deformacijos čia sumažėjo 32,31 %.

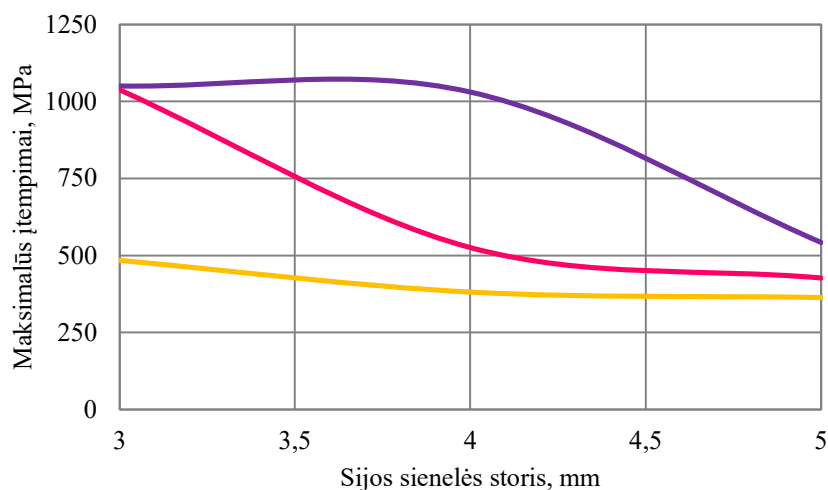
Kiek aukščiau jau aptarta, kokią įtaką sienelės storis daro konkrečios medžiagos sijos. Kad būtų galima plačiau suprasti parinktos medžiagos svarbą, žemiau pateikiami grafikai (29-34 pav.) vaizduojantys kaip skirtingose medžiagose kinta absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai keičiant sijos sienelės storį.



**29 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 4m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

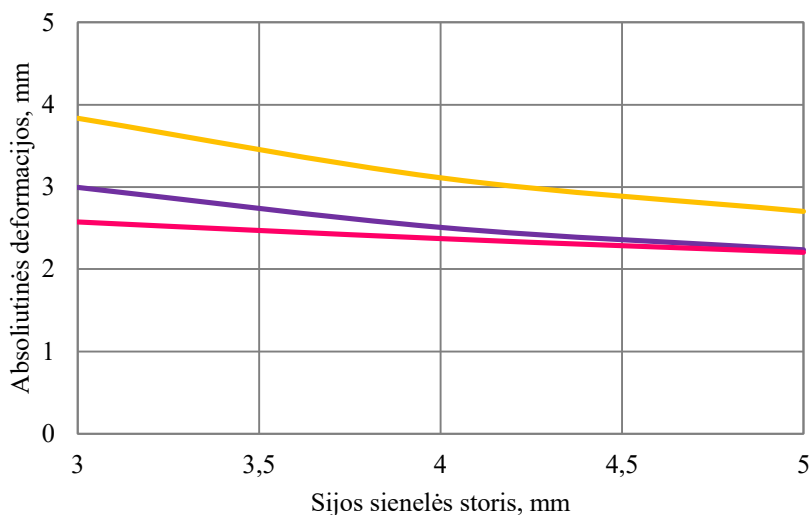
Iš 29 pav. pavaizduoto grafiko matyti, kad esant 4 m/s greičiui smūgio metu didžiausias absoliutinės deformacijos patiria sija pagaminta iš ALU 3105, tuo tarpu mažiausios absoliutinės deformacijos po smūgio matomos sijoje kurios medžiaga S355N. Sijos sienelės storiui keičiantis plieno X5CrNi18-10 sijoje po smūgio atsirandančios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 9,57 % mažesnės nei ALU 3105 sijoje pastebimos absoliutinės deformacijos, tačiau 22,23 % didesnės nei plieno S355N sijoje po smūgio atsirandančios deformacijos. Iš ALU 3105 lydinio pagamintoje sijoje po smūgio

atsiradusios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 33,94 % didesnės nei sijoje pagamintoje iš S355N plieno.



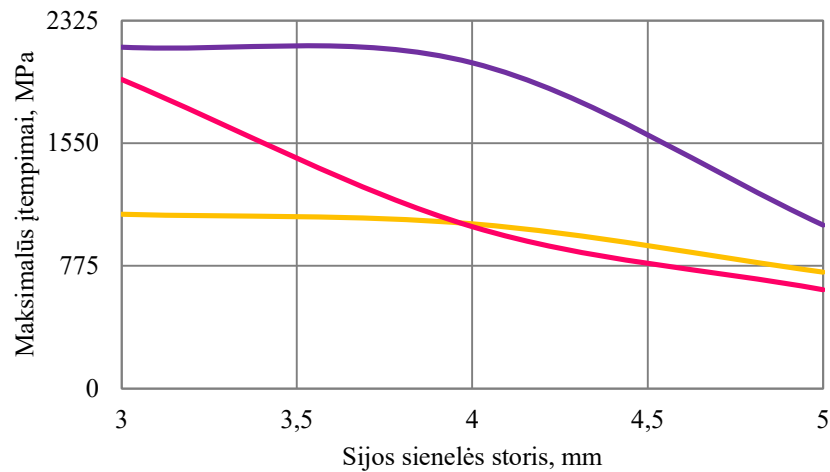
**30 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 4 m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

Lyginant skirtingų medžiagų maksimalius įtempimus kintant sijos sienelės storiui pastebima, kad įtempimų kitimą vaizduojančių kreivių pavidalai skiriasi ir vienintelis visų šių medžiagų panašumas yra tai, kad didėjant sijos sienelės storiui įtempimai mažėja. Mažiausius maksimalius įtempimus patiria sija pagaminta iš ALU 3105 lydinio, tuo tarpu didžiausi įtempimai pastebimi X5CrNi-18-10 plieno sijoje (30 pav.). Įtempimai ALU 3105 siose yra vidutiniškai 61,86 % mažesni nei plieno S355N sijoje ir vidutiniškai 113,42 % mažesni nei plieno X5CrNi18-10 sijoje. Plieno S355N sijoje susidaro vidutiniškai 31,85 % mažesni įtempimai, nei X5CrNi18-10 plieno sijoje.



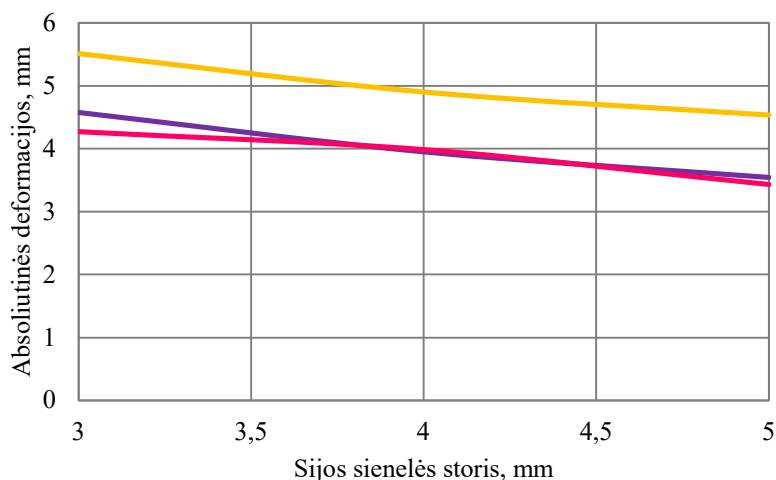
**31 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 10 m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

Esant kiek didesniai, 10 m/s greičiui smūgio metu, absoliutinės deformacijos skirtingų medžiagų sijose keičiant sijos sienelės storį kinta panašiai, kaip ir esant 4 m/s greičiui. Iš grafiko (31 pav.) matyti, kad didėjant sijos sienelės storiui absoliutinės deformacijos skirtinguose metaluose tarpusavyje artėja, 5 mm storio sijose plieno S355N ir plieno X5CrNi18-10 deformacijos pateiktame grafike vaizduojamos visai šalia kitos ir skirtumas tarp šių rezultatų yra 3,38 %, S355N sijoje deformacijos mažesnės. Kaip ir mažesnio greičio smūgio metu grafike, taip ir šiame matoma, kad didžiausios absoliutinės deformacijos yra ALU 3105 sijoje, o mažiausios S355N plieno sijoje. Iš ALU 3105 lydinio pagamintoje sijoje, kintant sijos sienelės storiui, po smūgio atsiradusios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 24,67 % didesnės nei X5CrNi18-10 plieno sijoje ir 34,95 % didesnės nei S355N plieno sijoje. Lyginant X5CrNi18-10 ir S355N sijas pastebima, kad pastaroji, keičiant sijos sienelės storį, patiria vidutiniškai 8,22 % mažesnes absoliutinės deformacijas.



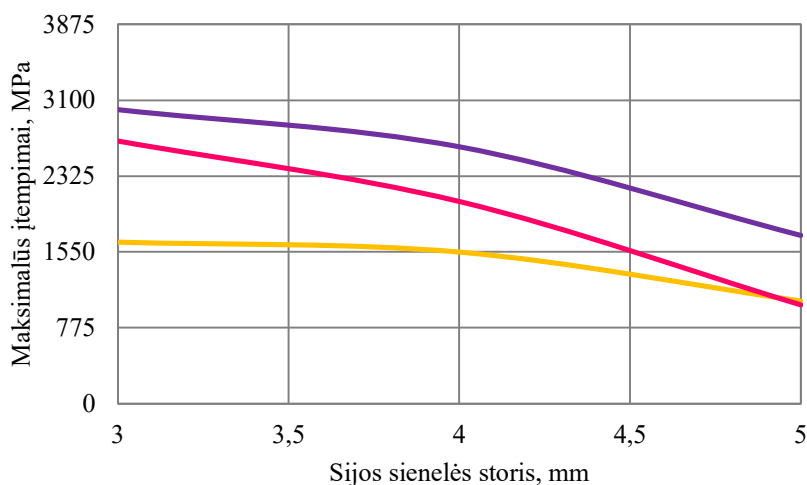
**32 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu 10 m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

Maksimalių įtempimų vaizdavimas grafike išlieka panašus, kaip ir esant mažesniai kliūties judėjimo greičiui, tačiau pastebima, kad persipina ALU 3105 ir S355N kreivės, X5CrNi18-10 maksimalūs įtempimai išlieka didžiausi – vidutiniškai 45,75 % didesni nei S355N plieno sijoje ir 82,41 % didesni nei ALU 3105 sijoje. Nors grafike S355N ir ALU 3105 kreivės ir persipina, tačiau ALU 3105 lydinio sija patiria vidutiniškai 25,15 % mažesnius maksimalius įtempimus.



**33 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu yra 15 m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

Stebint kaip kinta absoliutinės sijos deformacijos po smūgio, esant 15 m/s greičiui smūgio metu (33 pav.) pastebima, kad didžiausios absoliutinės deformacijos išlieka ALU 3105 sijoje, o plieno S355N ir X5CrNi18-10 absoliutinės deformacijos yra artimos viena kitai ir šias deformacijas vaizduojančios kreivės grafike persidengia. ALU 3105 sijoje po smūgio atsiradusios deformacijos yra 23,82 % didesnės nei X5CrNi18-10 sijoje ir 27,95 % didesnės nei S355N sijoje atsiradusios deformacijos. Nors abiejų plienų absoliutinės deformacijos yra labai artimos, tačiau S355N sijoje po smūgio atsiradusios deformacijos yra 3,34 % mažesnės nei X5CrNi18-10 sijoje.



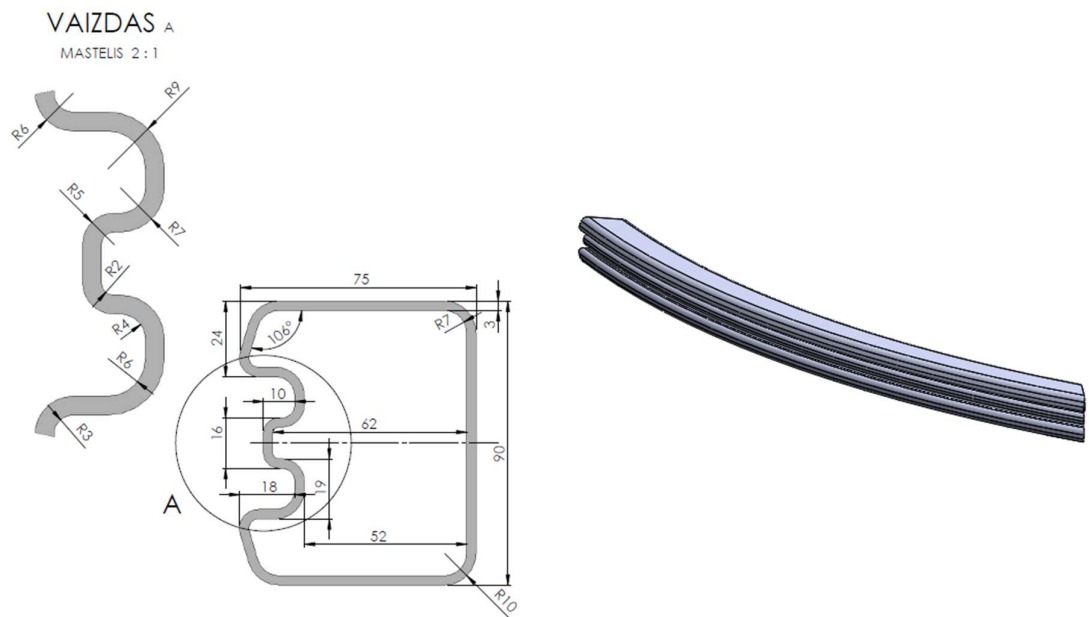
**34 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai greitis smūgio metu 15 m/s, o sija yra pagaminta iš: (—) – ALU 3105; (—) – X5CrNi18-10; (—) – S355N

Padidinus greitį smūgio metu iki 15 m/s maksimalių įtempimų grafikas (34 pav.) tampa nebepanašus į aukščiau vaizduojamus įtempimų grafikus esant mažesniems judėjimo greičiams. Nors didžiausi įtempimai išlieka X5CrNi18-10 sijoje, o mažiausi – ALU 3105, o šių medžiagų įtempimų kitimo

kreivės, keičiantis sijos sienelės storiui, lieka panašios į 30 pav. ir 32 pav. vaizduojamas įtempimų kitimo kreivės, tačiau S355N plieno sijos įtempimų kitimo kreivės pavidalas pakinta. Esant mažesniems greičiams smūgio metu, S355N sijos įtempimų kreivė imdavo plokštėti sijos sienelės storiui padidėjus iš 4 mm į 5 mm, o esant 15 m/s greičiui smūgio metu kreivės plokštėjimas nebepastebimas – įtempimai sparčiau mažėja didėjant sienelės storiui. S355N sijoje atsirandantys maksimalūs įtempimai yra vidutiniškai 27,51 % mažesni nei X5CrNi18-10 sijoje, tačiau 35,62 % didesni nei ALU 3105 sijoje. ALU 3105 sija, lyginant su X5CrNi18-10 sija, patiria 72,93 % mažesnius įtempimus.

### 4.3. Sijos skerspjūvio įtaka

Apžvelgtuose kitų mokslininkų darbuose [11] buvo minima sijos skerspjūvio įtaka sijos deformacijoms smūgio metu. Kad galėtume iširti, kaip šis sijos geometrijos pokytis veikia sijos deformacijas, tiriamos sijos originalaus skerspjūvio pagrindu nubraižomas patobulintas jo variantas (35 pav.).



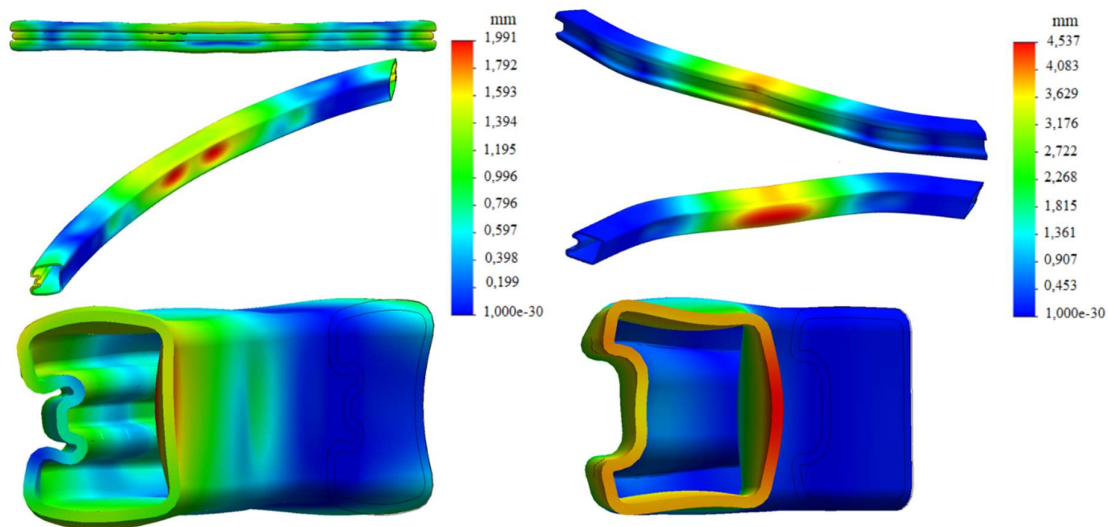
35 pav. Modifikuota originalaus sijos skerspjūvio forma

#### 4.3.1. Keičiamas sijos sienelės storis modifikuotame skerspjūvyje

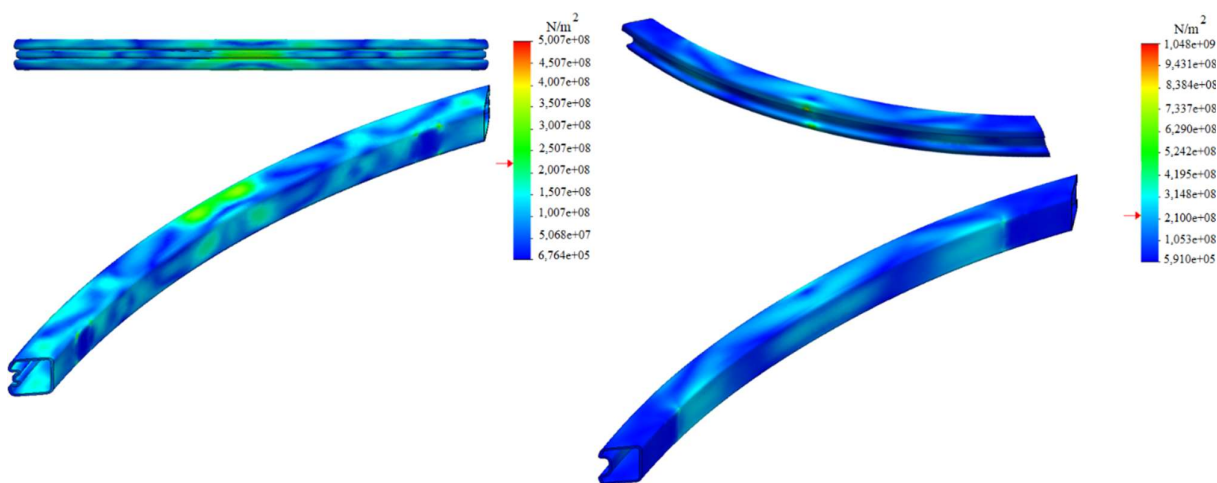
Kad būtų įvertinama ar sijos skerspjūvio pakeitimas yra naudingas ir ar sijos deformacijos smūgio metu sumažėjo, atliekamas analogiškas tyrimas 4.2. skyriuje atliktam tyrimui su originalia sija. Šių skaičiavimų metu tiriamos pusrėmio skersinės sijos medžiaga – ALU 3105.

Sijos po šio pakeitimo pasunkėjo 5,74 %.

Po smūgio sijos deformacijos (36 pav.) ir įtempimai (37 pav.) modifikuotos formos sijoje yra pastebimai mažesni nei originalios formos sijoje.



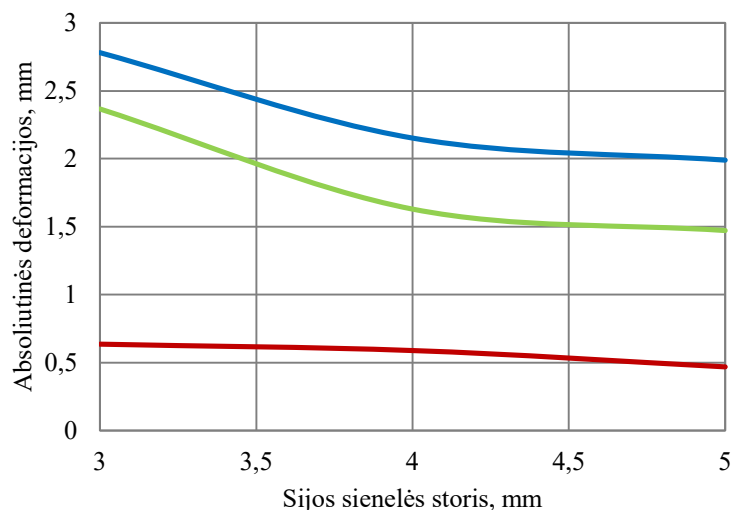
**36 pav.** Deformacijų pasiskirstymas modifikuoto profilio sijoje (kairėje, dešinėje – originalaus skerspjūvio sija), kuomet sijos sienelės storis 5mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 15m/s, pjūvio (apačioje) mastelis 1:10



**37 pav.** Įtempimų pasiskirstymas sijoje, kuomet sijos sienelės storis 5mm, sijos medžiaga ALU 3105, greitis smūgio metu 15m/s, kairėje – modifikuoto skerspjūvio sija, dešinėje – originalaus skerspjūvio sija

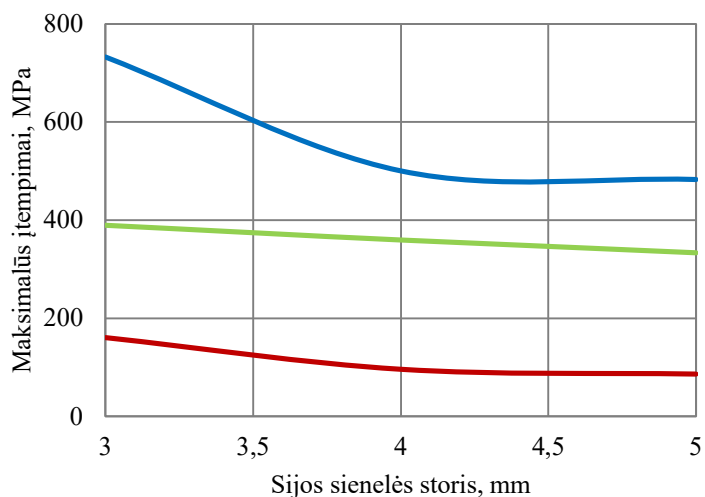
Stipruminių skaičiavimų rezultatai, modifikavus sijos skerspjūvi, pateikiami 38-41 pav.





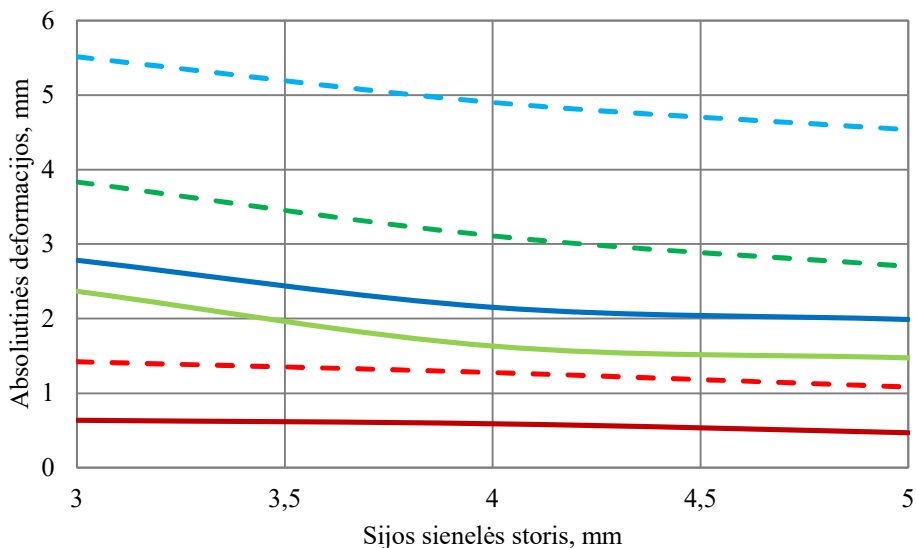
**38 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai naudojama modifikuoto skerspjuvio sija, greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Atlikus skaičiavimus su antruoju sijos skerspjuviu gaunami rezultatai tiek savo dydžiu, tiek kitimo grafikų pavidalu skiriasi nuo originalios sijos. Iš pateiktų rezultatų (38 pav.) matyti, kad esant mažam kliūtis judėjimo greičiui absoliutinių deformacijų mažėjimas yra nežymus. Didesnių greičių kreivėse pastebimas labai panašus dėsningumas – sienelės storiui pakitus iš 3 mm į 4 mm deformacijos ženkliai sumažėja, o sienelės storiui padidėjus nuo 4 mm į 5 mm deformacijos nors ir mažėja, tačiau ne taip intensyviai. Deformacijas vaizduojanti kreivės trajektorija ima plokštėti. Sijos sienelės storiui padidėjus iš 3 mm į 4 mm sijos deformacijos vidutiniškai sumažėja 32,33 %, o storiui padidėjus iš 4 mm į 5 mm absoliutinės deformacijos sumažėja vidutiniškai 11,14 %. Sijos sienelės storiui padidėjus iš 3 mm į 5 mm sijos absoliutinės deformacijos sumažėja 47,06 %.



**39 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio, kai naudojama modifikuoto skerspjuvio sija, o greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

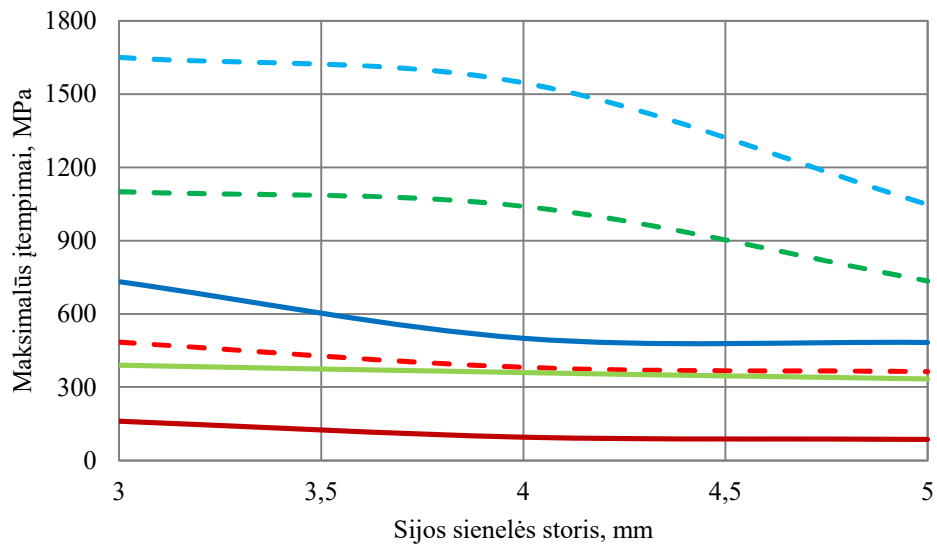
Sijos maksimalių įtempimų grafike (39 pav.) visais tirtais greičiais smūgio metu maksimalių įtempimų priklausomybė nuo sijos sienelės storio skirtinga. 4 m/s ir 15 m/s greičio smūgio metu kreivės, kintant sienelės storiui iš dalies yra panašios, tuo tarpu 10 m/s kreivės trajektorija artima tiesinei. Maksimalūs įtempimai sijos sienelės storiui pasikeitus iš 3 mm į 4 mm vidutiniškai sumažėja 34,23 %, o storiui padidėjus iš 4 mm į 5 mm – 5,85 %. Sijos sienelės storiui padidėjus iš 3 mm į 5 mm maksimalūs įtempimai antrojo skerspjūvio profilyje sumažėja 42,08 %.



**40 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybės palyginimas nuo sijos sienelės storio, kuomet naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, o greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s ir originalaus skerspjūvio sija, kai greitis smūgio metu: (---) – 4 m/s; (---) – 10 m/s; (---) – 15 m/s

Kad lengviau būtų galima palyginti ir įvertinti pusrėmio skersinės sijos deformacijų priklausomybės nuo sijos sienelės storio pokyčius dviejų skirtingų skerspjūvių sijos, pateikiamas bendras išnagrinėtų atvejų grafikas (40 pav.), kuriame aiškiai matomos ženkliai mažesnės deformacijos modifikuotoje sijoje. Lyginant 3 mm sienelės storio sijas, modifikuoto skerspjūvio sijoje atsirandančios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 86,2 % mažesnės nei originalaus skerspjūvio sijoje. 4 mm sienelės storio modifikuoto skerspjūvio sijoje po smūgio atsiradusios maksimalios deformacijos yra 112,49 % mažesnės nei originalaus skerspjūvio 4 mm sienelės storio sijoje, o 5 mm sienelės storio modifikuotoje sijoje – 111,29 % mažesnės absoliutinės deformacijos.

Maksimalūs įtempimai po smūgio, modifikuoto skerspjūvio sijoje, kaip ir absoliutinės deformacijos, lyginami su originalaus skerspjūvio sija (41 pav.). Čia taip pat pastebimi akivaizdžiai mažesni maksimalūs įtempimai modifikuoto skerspjūvio sijoje. 3 mm sienelės storio originalaus skerspjūvio sijoje po smūgio atsiradę įtempimai yra vidutiniškai 152,17 % didesni, nei modifikuoto skerspjūvio sijoje. 4 mm sienelės storio originalaus skerspjūvio sijoje atsirandantys įtempimai yra net 210,57 % didesni, nei modifikuoto skerspjūvio sijoje, o 5 mm sienelės storio – 137,67 %.

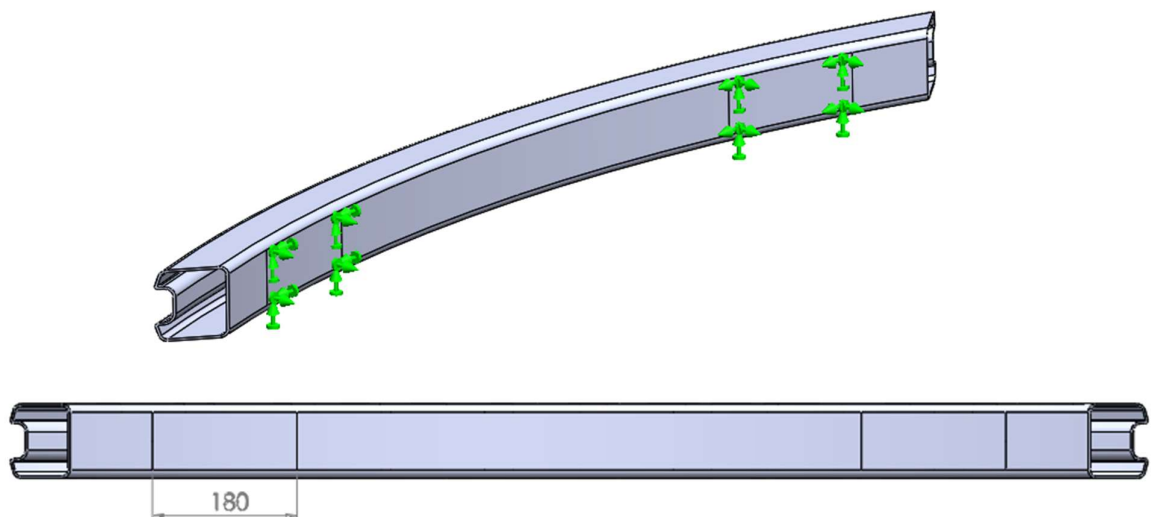


**41 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybės palyginimas nuo sijos sienelės storio, kuomet naudojama modifikuoto skerspjūvio sija, o greitis smūgio metu yra: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s ir originalaus skerspjūvio sija, kai greitis smūgio metu yra: (---) – 4 m/s; (---) – 10 m/s; (---) – 15 m/s

#### 4.4. Sijos įtvirtinimo taškų įtaka

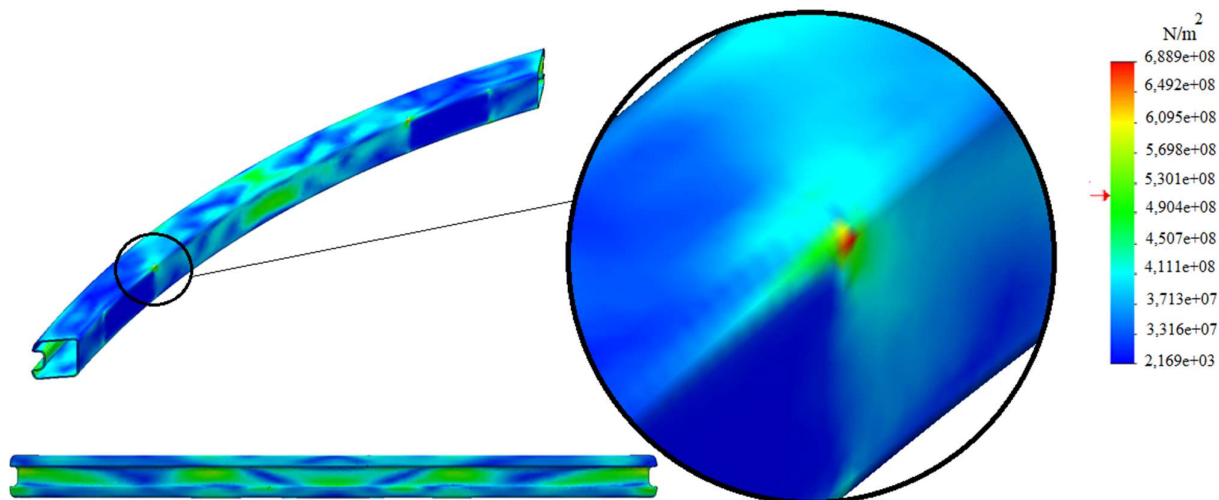
Originaliai skersinė pusrėmio sija yra pritvirtinama išilginių sijų galuose, taip įgaudama du įtvirtinimo taškus abiejuose sijos galuose. Sekantis tyrimo etapas skirtas nustatyti, kaip pakistų sijos „elgsena“ smūgio metu, jei įtvirtinimo plotas būtų didesnis nei originalioje sijoje.

Įtvirtinimo taškų plotas pasirenkamas 180 mm pločio – 2 kartus didesnis plotas nei originalioje sijoje (42 pav.). Skaičiavimams pasirenkama sijos medžiaga ALU 3105, o sijos sienelės storis – 3 mm.



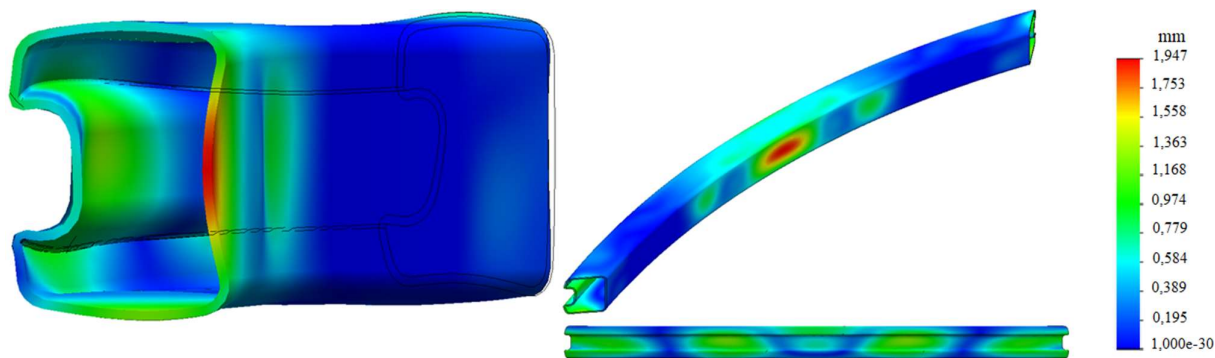
**42 pav.** Sijos įtvirtinimo taškai

Kaip po smūgio pasiskirsto maksimalūs įtempimai ir absoliutinės deformacijos matoma iš 43 ir 44 pav.



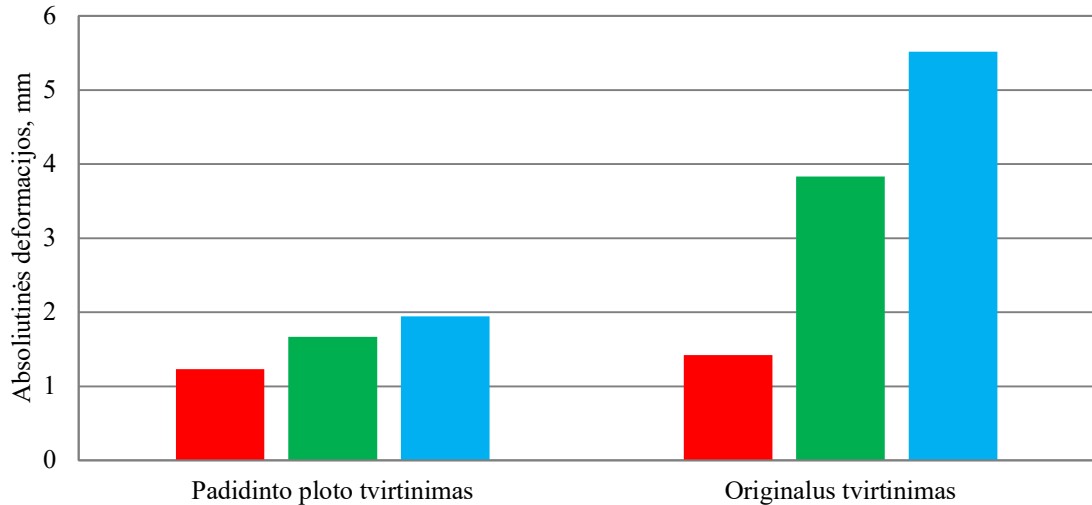
43 pav. Įtempimų pasiskirstymas sijoje įtvirtintoje 2 kartus didesniame plote, kai greitis smūgio metu 15 m/s

Iš 43 pav. aiškiai matomos įtvirtinimų vietos – tvirtinimo taškų plote pastebimi aiškiai mažesni įtempimai. Taip pat, esant didesniam greičiui, pastebimas įtempimų padidėjimas tvirtinimo taškų krašte, viršuje, esančiame arčiau sijos geometrinio centro.



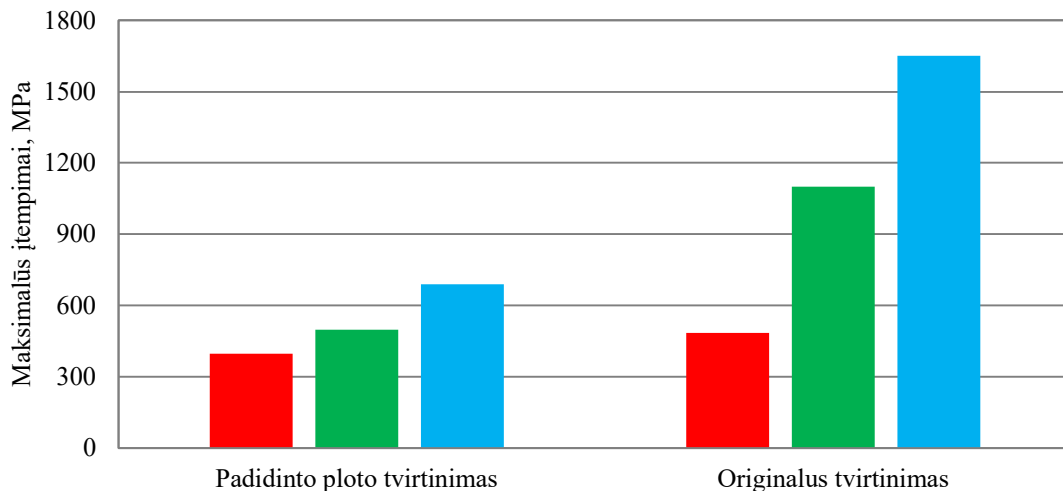
44 pav. Deformacijų pasiskirstymas sijoje įtvirtintoje 2 kartus didesniame plote, kai greitis smūgio metu 15 m/s, pjūvio (kairėje) mastelis 1:5

Kaip ir įtempimų pasiskirstyme, taip ir deformacijų pasiskirstyme aiškiai matomos kuriose vietose sija yra įtvirtinta – deformacijos čia mažiausios.



**45 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų smūgio vietoje priklausomybė nuo tvirtinimo ploto, kai greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Lyginant absoliutines deformacijas originaliai įtvirtintoje sijoje ir sijoje, kurios tvirtinimo plotas yra dvigubai didesnis, yra pastebimas akivaizdus absoliutinių deformacijų sumažėjimas antrojoje sijoje (45 pav.). Kuomet greitis smūgio metu yra 4 m/s absoliutinės deformacijos sijoje su dvigubai didesniu įtvirtinimo plotu yra 15,43 % mažesnės nei sijoje kuri yra tvirtinama originaliai. Esant 10 m/s greičiui smūgio metu, padidinto ploto tvirtinimo sija smūgio metu atsirandancios jėgos priverčia deformuotis 130,19 % mažiau, nei originalaus tvirtinimo sija, o esant 15 m/s greičiui smūgio metu – 183,30 % mažiau nei originalaus tvirtinimo sija.



**46 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo tvirtinimo ploto, kai greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Maksimalių įtempimų sumažėjimas lyginant padidinto ploto tvirtinimo sija su originalaus tvirtinimo sija iš pateikto grafiko 46 pav. yra tikrai didelis. Pastebima, kad kuo greitis smūgio metu yra didesnis, tuo labiau išauga skirtumas tarp lyginamų sijų. Sija įtvirtinus du kartus didesniame plote ir esant 4 m/s

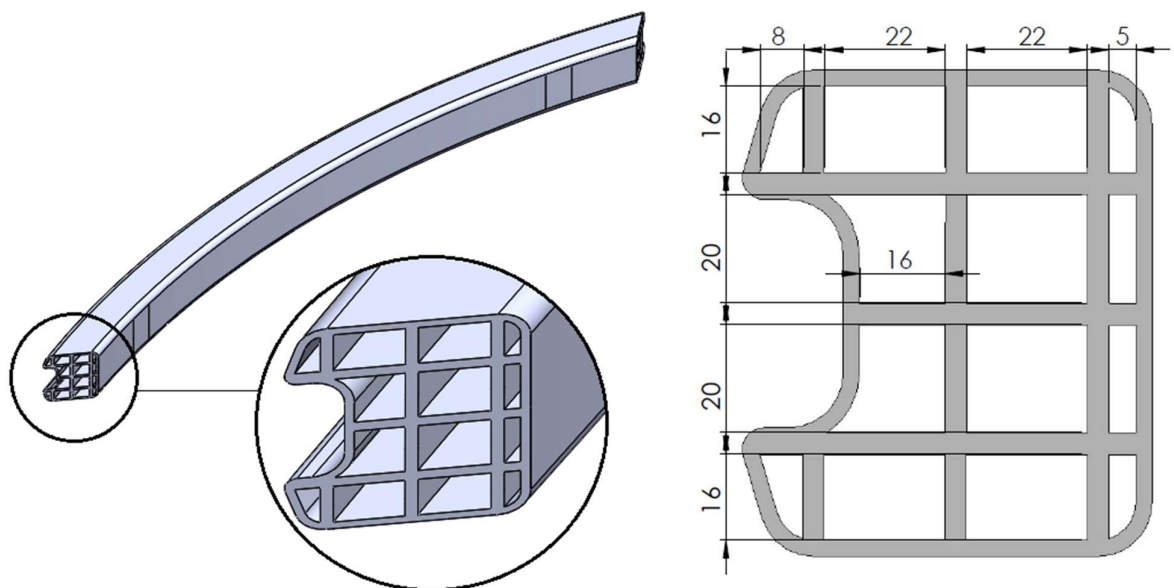
greičiui smūgio metu, maksimalūs įtempimai sumažėja 22,05 %. Esant 10 m/s greičiui smūgio metu, įtempimai sumažėja 121,35 %, o esant 15 m/s greičiui smūgio metu maksimalūs įtempimai sumažėja 139,80 %.

#### 4.5. Sijos standumo briaunų įtaka

Standumo briaunos yra vienas iš sprendimų, norint sustiprinti detalę. Jos gali būti įvairaus dydžio, formos, storio.

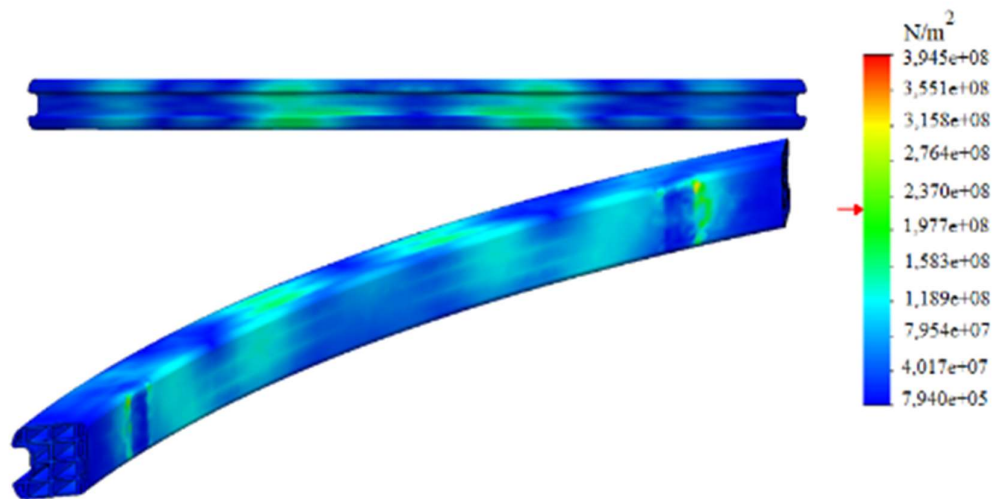
##### 4.5.1. Standumo briaunų storis

Standumo briaunų storio įtaka sijos deformacijoms smūgio metu tiriama naudojant standumo briaunas sijos vidinėje dalyje sudarant tinklelį (47 pav.). Šiam tyrimui taip pat naudojamas ALU 3105 lydinys, o pačios sijos sienelės storis visų skaičiavimų metu nekinta – 3 mm. Standumo briaunų storis: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm.

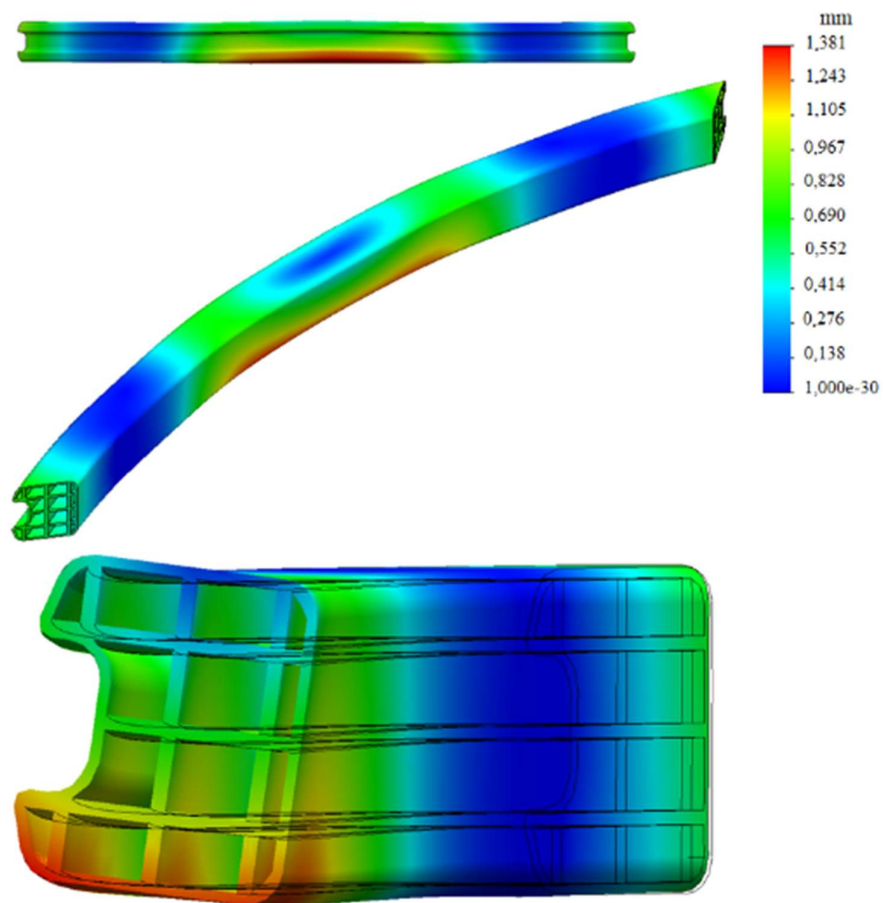


47 pav. 4mm storio standumo briaunų tinklelis profilio viduje

Įtempimų ir deformacijų pasiskirstymas sijoje po smūgio matomas 48 ir 49 pav.

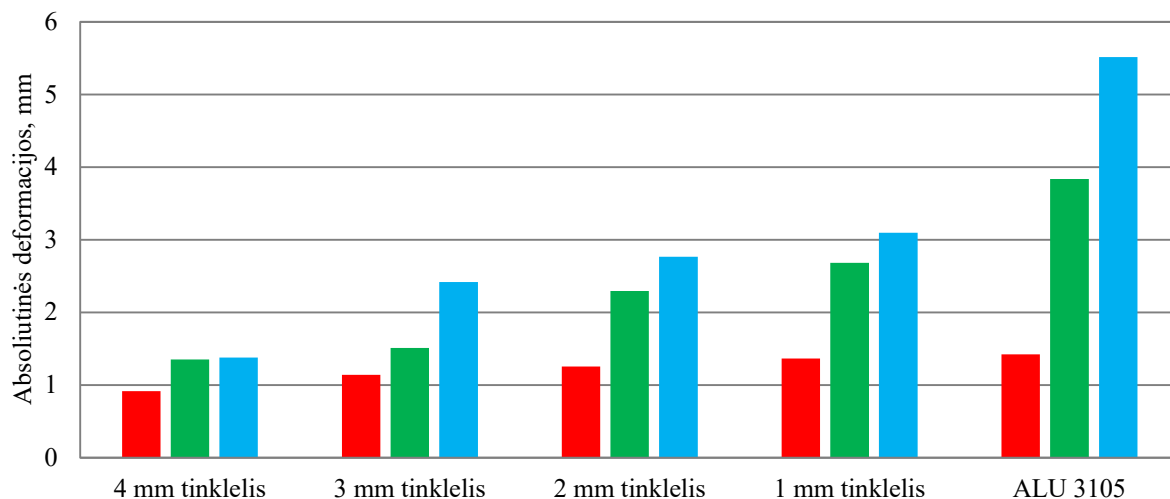


48 pav. Įtempimų pasiskirstymas sijoje su 4 mm storio standumo briaunų tinkleliu, kai greitis smūgio metu 15 m/s



49 pav. Deformacijų pasiskirstymas sijoje su 4 mm storio standumo briaunų tinkleliu, kai greitis smūgio metu 15 m/s, pjūvio mastelis 1:10

Skaičiavimų rezultatai pateikiami 50 ir 51 pav.



**50 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų tinklelio storio, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

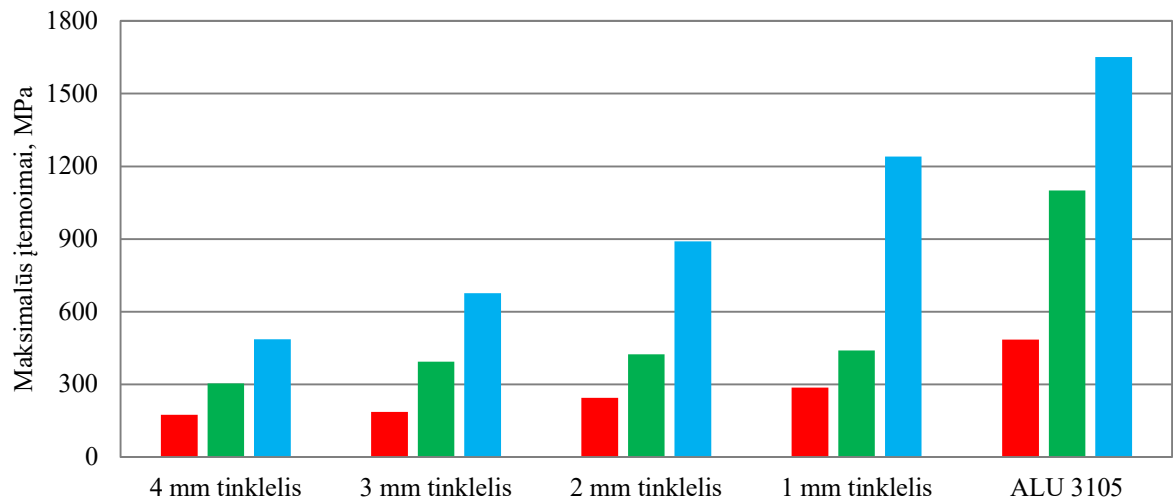
Iš 50 pav. matoma, kad kuo standumo briaunų storis yra didesnis, tuo po smūgio atsirandančios absoliutinės deformacijos yra mažesnės. Lyginant originalią siją ir siją, kurioje yra naudojamas 1 mm standumo briaunų tinklelis, absoliutinės deformacijos vidutiniškai sumažėja 50,84 %, naudojant 2 mm storio standumo briaunų tinklelio siją, ši lyginant su originalia patiria vidutiniškai 70,38 % mažesnes absoliutines deformacijas, analogiškai 3 mm storio standumo briaunas turinti sija – 112,43 %, o 4 mm storio standumo briaunas turinti sija 195,23 % mažesnes deformacijas, nei originali sija.

Lyginant standumo briaunas turinčias sijas tarpusavyje pastebima, kad 4 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija patiria vidutiniškai 38,98 % mažesnes absoliutines deformacijas nei 3 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija, 73,27 % mažesnes deformacijas nei 2 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija ir 95,72 % mažesnes deformacijas, nei 1 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija.

3 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje absoliutinės deformacijos po smūgio yra 24,67 % mažesnės, nei 2 mm standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje ir 40,82 % mažesnės nei 1 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje.

2 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija patiria vidutiniškai 12,96 % mažesnes deformacijas.





**51 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų tinklelio storio, kai sijos skerspjūvio sienelės storis 3 mm, o greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Iš 51 pav. matomas panašus dėsningumas, kaip ir 50 pav. vaizduojamose deformacijose – kuo storesnis standumo briaunų tinklelis, tuo mažesni maksimalūs įtempimai atsiranda sijoje.

Palyginus originalią ALU 3105 siją su sijomis, turinčiomis skirtingo storio standumo briaunų tinklelius, matoma, kad: 1 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje susidaro vidutiniškai 64,54 % mažesni maksimalūs įtempimai, 2 mm storio tinklelį turinčiose sijoje – 107,68 %, 3 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje – 157,18 %, o 4 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje – 236,12 % mažesni įtempimai.

Lyginant sijas tarpusavyje: 1 mm standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje susiformuoja 104,25 % didesni įtempimai nei 4 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje, 2 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje – 61,85 % didesni įtempimai, o 3 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje – 30,69 % didesni įtempimai, nei 4 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje.

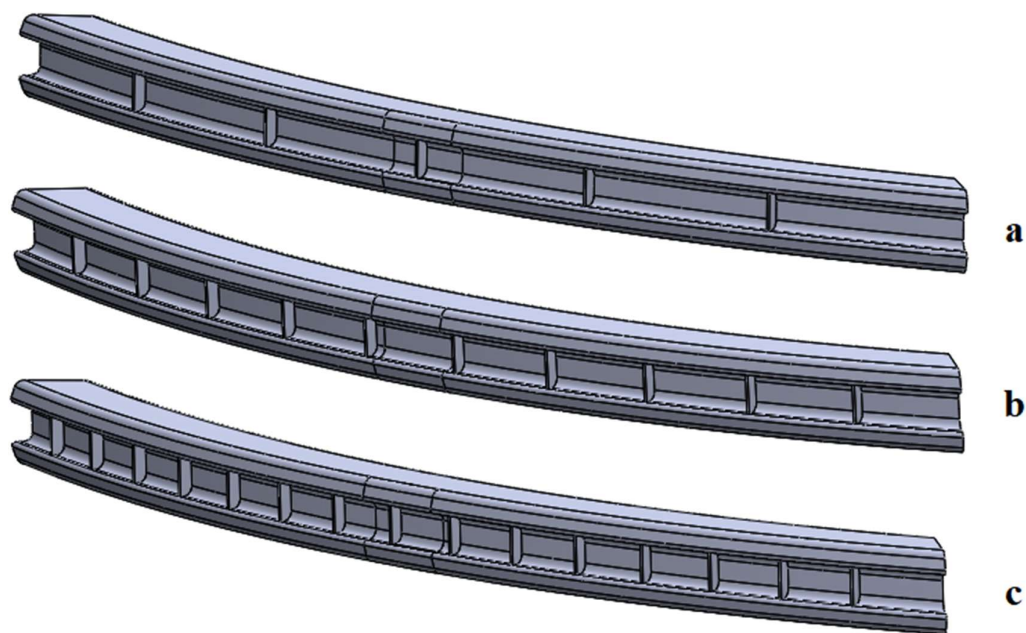
3 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje susiformavę įtempimai yra 56,28 % mažesni nei 1 mm storio ir 23,84 % mažesni nei 2 mm storio standumo briaunų tinklelius turinčiose siose. Tuo tarpu 2 mm storio standumo briaunų tinklelį turinčioje sijoje susidarę įtempimai yra 26,2 % mažesni nei 1 mm storio standumo briaunų tinklelį turinti sija.

#### 4.5.2. Standumo briaunų išdėstymo tankis

Standumo briaunos gali būti įvairių formų, gali skirtis jų išdėstymas, kiekis. Sekantis tyrimo etapas – nustatyti kokią įtaką standumo briaunų kiekis daro skersinės pusrėmio sijos deformacijoms smūgio metu. Šiam tikslui pasiekti pasirenkami trys sijų su standumo briaunomis variantai (52 pav.):

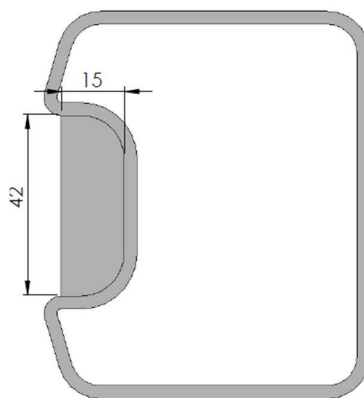
- **a variantas:** 5 standumo briaunos, kurių storis 3 mm. Tarpai tarp standumo briaunų – 230 mm, nuo sijos kraštų iki pirmosios standumo briaunos – 232,5 mm. Sijų svorių skirtumas, lyginant originalią siją ir siją su standumo 5 briaunomis – 0,74 %.

- **b variantas:** 10 standumo briaunų, standumo briaunos storis 3 mm. Tarpai tarp standumo briaunų – 126 mm, nuo sijos kraštų iki pirmosios standumo briaunos – 125,5 mm. Sijų svorių skirtumas, lyginant originalią siją ir siją su 10 standumo briaunų – 1,41 %.
- **c variantas:** 15 standumo briaunų, standumo briaunos storis 3 mm. Tarpai tarp standumo briaunų – 85 mm, nuo sijos kraštų iki pirmosios standumo briaunos – 97,5 mm. Sijų svorių skirtumas, lyginant originalią siją ir siją su 15 standumo briaunų – 2,07 %.



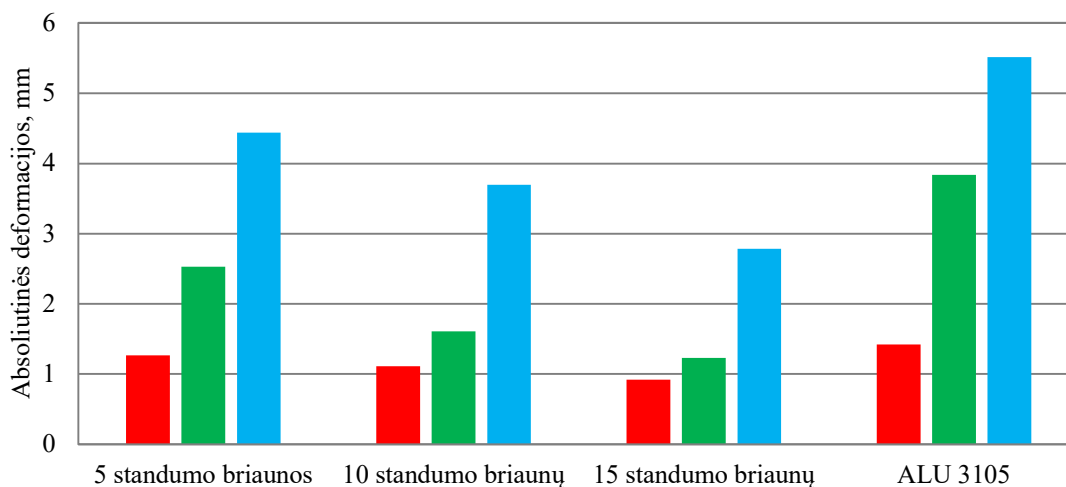
**52 pav.** Skirtingas standumo briaunų išdėstymas ant skersinės pusrėmio sijos

Standumo briaunų vieta šiam tyrimui pasirinkta sijos išorinėje dalyje esančiame išilginiame įgilinime (53 pav.).



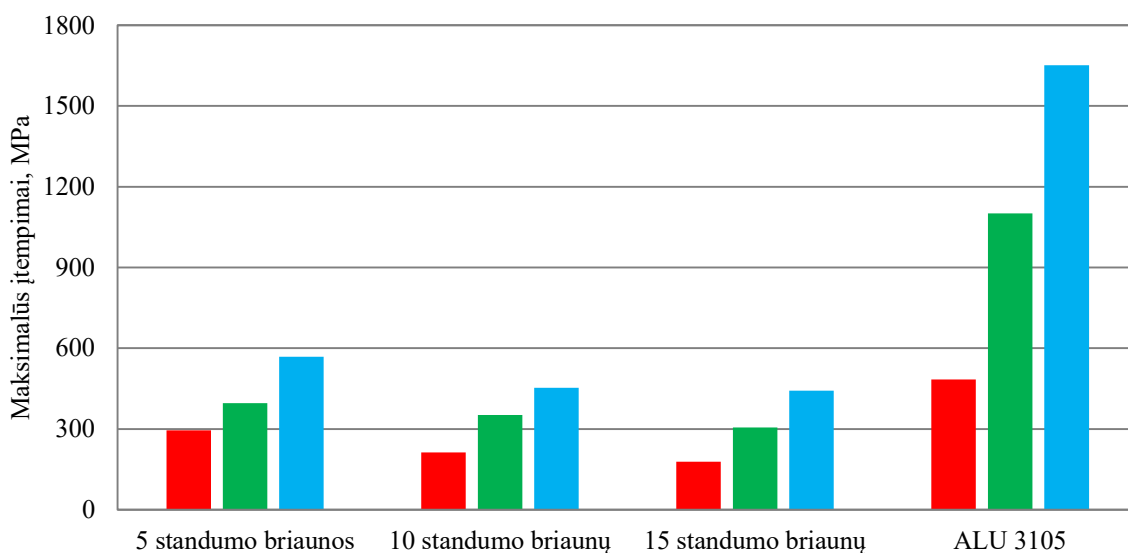
**53 pav.** Standumo briaunos geometrija

Skaičiavimams atlikti pasirenkama pusrėmio skersinė sija pagaminta iš ALU 3105 lydinio, sijos sienelės storis – 3 mm. Atlikus skaičiavimus, jų rezultatai pateikiami 54 ir 55 pav.



**54 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų skaičiaus, greitis smūgio metu:  
 (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Iš 54 pav. pavaizduotų absoliutinių matomas deformacijų mažėjimas didinant standumo briaunų kiekį. Palyginus su originalia sija, sijoje, turinčioje 5 standumo briaunas, po smūgio susidaro vidutiniškai 30,78 % mažesnės absoliutinės deformacijos. Padidinus standumo briaunų skaičių iki 10, šioje sijoje susidarancios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 28,39 % mažesnės nei sijoje turinčioje 5 standumo briaunas ir vidutiniškai 67,91 % mažesnės nei originalioje sijoje. Dar kartą padidinus standumo briaunų skaičių iki 15, sijoje susidarancios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 30,84 % mažesnės nei sijoje turinčioje 10 standumo briaunų, 67,99 % mažesnės nei 5 standumo briaunas turinčioje sijoje ir 119,7 % mažesnės nei originalioje sijoje susidarancios absoliutinės deformacijos.



**55 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų kiekio, kai greitis smūgio metu:  
 (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

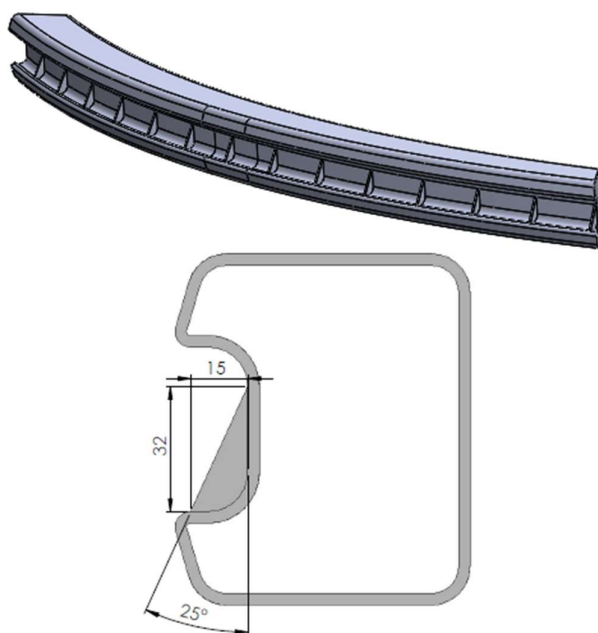
Sijose, kurios papildomai yra sustiprintos standumo briaunomis, susidarantys maksimalūs įtempimai yra ženkliai mažesni nei originalioje sijoje. Iš 55 pav. pateiktų skaičiavimo rezultatu matoma, kad pavaizduoti įtempimai didelį sumažėjimą parodo tik tarp originalios sijos ir sijų su standumo briaunomis. Tarp sijų, didėjant standumo briaunų skaičiui, įtempimų mažėjimas nėra toks ryškus. Lyginant su originalia sija, 5 standumo briaunas turinčioje sijoje po smūgio susidarantys įtempimai yra vidutiniškai 54,16 % mažesni, 10 standumo briaunų turinčioje sijoje maksimalūs įtempimai yra vidutiniškai 90,87 % mažesni, o 15 standumo briaunų turinčioje sijoje – 110,10 % mažesni maksimalūs įtempimai. Tarpusavyje lyginant įtempimų pasikeitimus sijose su standumo briaunomis, pastebima, kad sijoje su 15 standumo briaunų susidarę maksimalūs įtempimai yra vidutiniškai 10,08 % mažesni, nei sijoje turinčioje 10 standumo briaunų ir vidutiniškai 36,29 % mažesni, nei įtempimai susidarantys sijoje turinčioje 5 standumo briaunas. Sija su 10 standumo briaunų skaičiavimų metu parodė vidutiniškai 23,81 % mažesnius susidarancius maksimalius įtempimus, nei 5 standumo briaunas turinčioje sijoje.

#### 4.6. Standumo briaunų forma

Platesniam sijos „elgsenos“ smūgio metu suvokimui, pasirenkami dar du sijos su skirtingų briaunų išdėstymu variantai:

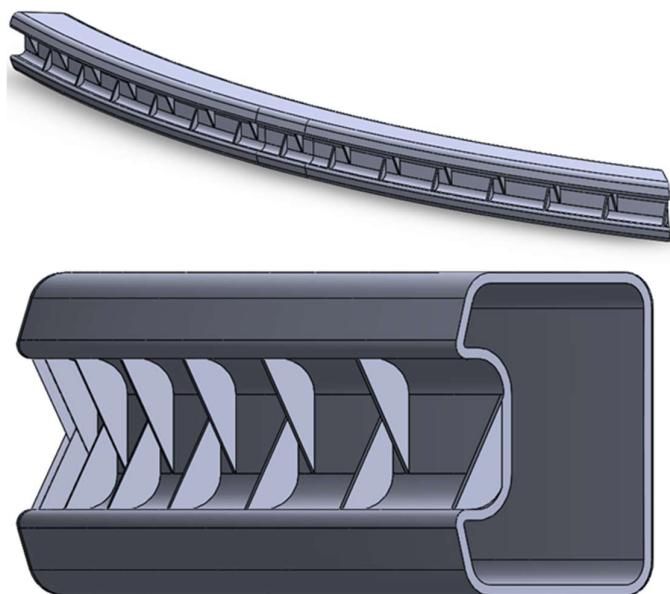
- **a forma:** standumo briaunos išdėstytos išorinėje sijos dalyje esančiame įgilinime. Standumo briaunos forma su nuožula, plačiausia briaunos vieta – apačioje. Iš viso ant sijos yra 13 standumo briaunų (56 pav.).
- **b forma:** standumo briaunos išdėstytos išorinėje sijos dalyje esančiame įgilinime, tiek viršuje, tiek apačioje. Standumo briaunos forma, kaip ir pirmajame variante, su nuožula, plačiausia apatinių briaunų vieta – apačioje, viršutinių – viršuje. Iš viso ant sijos yra 26 standumo briaunos (57 pav.).

Tiriamų formų standumo briaunų išdėstymas ant sijos pasirenkamas: tarpai tarp apatinių standumo briaunų – 95 mm. Pirmojo (a) varianto standumo briaunos nuo sijos kraštų iki pirmųjų standumo briaunų yra 75 mm atstumu. Antrojo (b) varianto apatinės standumo briaunos yra išdėstomos taip pat, kaip ir pirmajame variante, o viršutinės nuo kraštų – 55 mm, tarpai tarp standumo briaunų – 98 mm. Standumo briaunų storis – 3 mm.



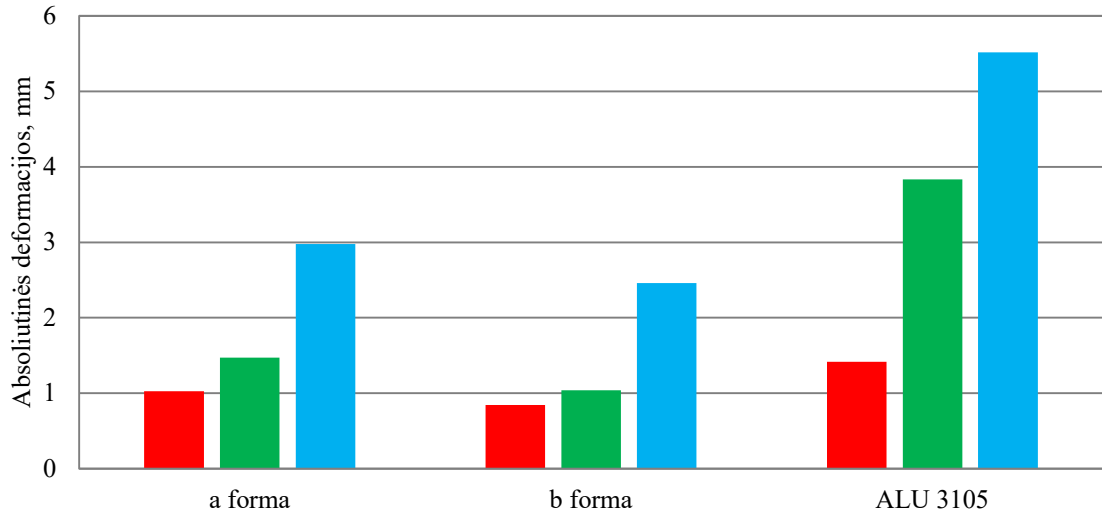
**56 pav.** Standumo briaunų formos a variantas

Antrojo varianto standumo briaunų geometrija yra tokia pati, kaip ir pavaizduota 55 pav. Šis variantas skiriasi tik tuo, kad papildomai, tokių pačių matmenų, tik apverstos standumo briaunos yra pridedamos ir viršutinėje pusrėmio skersinės sijos įgilinimo dalyje (57 pav.).



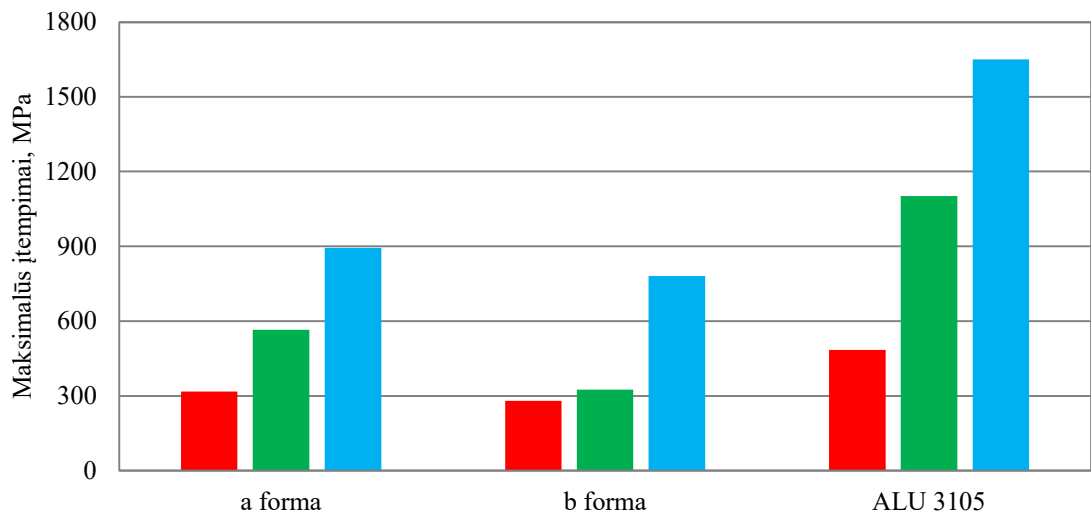
**57 pav.** Standumo briaunų formos b variantas

Atlikus stipruminius skaičiavimus su pasirinktomis standumo briaunomis gaunami rezultatai pateikiami 58 ir 59 pav.



**58 pav.** Sijos absoliutinių deformacijų priklausomybė nuo standumo briaunų formos, kai greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

Iš 58 pav. pavaizduotų rezultatų matoma, kad a formos sija po smūgio patiria vidutiniškai 96,6 % mažesnes absoliutines deformacijas nei originali sija, bet 26,1 % didesnes absoliutines deformacijas, nei b formos standumo briaunas turinti sija. Tuo tarpu b formos standumo briaunas turinti sija patiria vidutiniškai 147,93 % mažesnes deformacijas, nei originali sija. Svarbu paminėti, kad b formos standumo briaunas turinčioje sijoje standumo briaunų skaičius yra dvigubai didesnis, nei a formos standumo briaunas turinčioje sijoje.



**59 pav.** Sijos maksimalių įtempimų priklausomybė nuo standumo briaunų formos, kai greitis smūgio metu: (—) – 4 m/s; (—) – 10 m/s; (—) – 15 m/s

59 pav. pavaizduoti maksimalūs po smūgio sijose susidarę įtempimai savo rezultatų vizualizacija primena 58 pav. pavaizduotus absoliutinių deformacijų rezultatus. Iš čia matoma, kad originali sija patiria vidutiniškai 91,99 % didesnius maksimalius įtempimus po smūgio, nei sija su a formos

standumo briaunomis ir taip pat patiria vidutiniškai 131,5 % didesnius maksimalius įtempimus, nei sija su b formos standumo briaunomis. Taip pat, a formos standumo briaunas turinti pusrėmio skersinė sija patiria vidutiniškai 20,58 % didesnius maksimalius įtempimus nei b formos standumo briaunas turinti sija.

Nors skirtumas tarp šių formų skaičiavimų rezultatų yra pastebimas, tačiau jis palyginus nėra toks ženklus įvertinus faktą, kad b formos standumo briaunas turinti sija turi dvigubai daugiau standumo briaunų.

## Išvados

1. Ištyrus sijų, pagamintų iš ALU 3105, X5CrNi18-10 ir S355N medžiagų, deformacijų ir įtempimų būvius nustatyta, kad labiausiai deformuojasi sija, pagaminta iš ALU 3105 lydinio (20,62 % didesnės deformacijos nei X5CrNi18-10 ir 36,44 % didesnės nei S355N), tačiau ALU 3105 lydinio sijoje smūgio metu atsirandantys įtempimai yra mažiausi (91,88% mažesni, nei X5CrNi18-10 ir 75,35 % mažesni nei S355N).
2. Ištyrus sijų, kurių sienelės storiai 3 mm, 4 mm ir 5 mm pastebima, kad didėjant sienelės storiui palaipsniui mažėja ir sijoje po smūgio atsirandančios deformacijos bei įtempimai. Pastorinus ALU 3105, X5CrNi18-10 ir S355N sijų sieneles nuo 3 mm iki 4 mm, deformacijos vidutiniškai sumažėjo atitinkamai 15,96 %, 18,14 % ir 8,31 %, o įtempimai sumažėjo atitinkamai 8,99 %, 8,72 % ir 57,05 %.
3. Ištyrus originalų ir modifikuotą sijos skerspjuvį, deformacijos ir įtempimai modifikuoto skerspjuvio sijoje pastebimi ženkliai mažesni nei susidarantys originalioje sijoje. Ištyrus 3 mm sienelės storio sijas, modifikuoto skerspjuvio sijoje atsirandančios absoliutinės deformacijos yra vidutiniškai 86,2 % mažesnės nei originalaus skerspjuvio sijoje. Įtempimai modifikuotoje sijoje mažesni 152,17 %.
4. Ištyrus sijas su standumo briaunų tinkleliu prieinama išvada – kuo standumo briaunų storis yra didesnis, tuo po smūgio atsirandančios absoliutinės deformacijos yra mažesnės. Lyginant originalią siją: 1 mm tinklelio absoliutinės deformacijos vidutiniškai sumažėja 50,84%, 2 mm – 70,38 %, 3 mm – 112,43 %, 4 mm – 195,23 %. Atitinkamai sumažėja ir įtempimai: 1 mm – 64,54 %, 2 mm – 107,68 %, 3 mm – 157,18 %, o 4 mm – 236,12 %.
5. Ištyrus standumo briaunų kiekio įtaką pastebima, kad sijoje, turinčioje 5 standumo briaunas, po smūgio susidaro vidutiniškai 30,78 % mažesnės absoliutinės deformacijos nei originalioje sijoje. Atitinkamai sijoje su 10 standumo briaunų – 67,91 %, o 15 standumo briaunų 119,7 % mažesnės absoliutinės deformacijos. Maksimalūs įtempimai taip pat sumažėjo 5 standumo briaunas turinčioje sijoje vidutiniškai 54,16 %, 10 standumo briaunų – 90,87 %, 15 standumo briaunų – 110,10 %. Sijos, turinčios standumo briaunas išorėje esančiame įgilinime nėra rekomenduotinas variantas. Tokių sijų deformacijos sumažėja palyginus ne per daugiausiai, tačiau jų gamybos kaina šoktelėtų kelis kartus. Standumo briaunos turėtų būti privirintos, tai kainuotų papildomai nemažus pinigus. Tuo pačiu apsunkinta ir masinė tokių detalių gamyba, nes sijos gamybos laikas ženkliai padidėtų



## Informacijos šaltinių sąrašas

1. TURBOSQUID. 3D model Crash Test Dummies 3D Models Collection [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-15]. Prieiga per: <<https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-model-crash-test-dummies-3-1379594>>.
2. IIHS. Ratings About Our Tests [žiūrėta 2020-05-15]. Prieiga per: <<https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests>>.
3. **P.R. Lande, R.V. Patil.** Analysis of Bumper Beam in Frontal collision [interaktyvus]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Indija, 2015, 2807-2810, ISSN(online):2319-8753, ISSN(print): 2347-6710 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[https://www.researchgate.net/publication/281469442\\_Analysis\\_of\\_Bumper\\_Beam\\_in\\_Frontal\\_collision](https://www.researchgate.net/publication/281469442_Analysis_of_Bumper_Beam_in_Frontal_collision)>
4. MITSUBISHI MOTORS' Technologies Meet Drivers' Desires to "Broaden Their Range of Activity and Take on Different Challenges [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-15]. Prieiga per: <<https://www.mitsubishi-motors.com/en/innovation/technology/library/rise.html?intcid2=innovation-technology-library-rise>>.
5. Applications – Car body – Crash Management Systems [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2020-05-15]. Prieiga per: <[https://www.european-aluminium.eu/media/1548/4\\_aam\\_crash-management-systems1.pdf](https://www.european-aluminium.eu/media/1548/4_aam_crash-management-systems1.pdf)>.
6. **L. Ramon-Villalonga, Th. Enderich.** Advanced Simulation Techniques for Low Speed Vehicle Impacts [interaktyvus]. Crash I. LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, 2007, B-I, 25-35 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://www.dynamore.de/de/download/papers/dynamore/de/download/papers/forum07/forum07/crash/advanced-simulation-techniques-for-low-speed>>.
7. Agreement concerning the adoption of uniform conditions of approval and reciprocal recognition of approval for motor vehicle equipment and parts [interaktyvus] 1958 [žiūrėta 2021-03-15]. Prieiga per: <<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2009/r042e.pdf>>.
8. **Frank Leimbach, Helge Kiebach.** Repairability and insurance ratings in the development of cars Vokietija, 2013, [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9781118354179.auto254>>.
9. **Erika Fechová, Jozef Kmech, Alena Vagaská, Dražan Kozak.** Material Properties and Safety of Cars at Crash Tests [interaktyvus]. Procedia Engineering, Slovakija, 2016, 263-268 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816311730>>.
10. **Alexander Falchenko.** What materials are used in the manufacture of car bodies? [interaktyvus] 2020, [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <https://avtotachki.com/en/tehnickeskaya-stat-ya-kakie-materialy-ispol-zuyutsya-v-proizvodstve-kuzovov/>.
11. **Niyazi Tanlak, Fazil O. Sonmez, Mahmut Senaltun.** Shape optimization of bumper beams under high-velocity impact loads [interaktyvus]. Engineering Structures, Turkija, 2015, 49-60 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615001911>>.
12. **Satyanarayana Kokkulaa, Magnus Langsetha, Odd Sture Hopperstada & Odd Geir Lademoa.** Behaviour of an automotive bumper beam-longitudinal system at 40% offset impact:

- an experimental and numerical study [interaktyvus]. Norvegija, 2005, 305-320, ISSN 1743-3533, [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[https://www.researchgate.net/publication/239277534\\_Behaviour\\_of\\_an\\_automotive\\_bumper\\_beam-longitudinal\\_system\\_at\\_40\\_offset\\_impact\\_An\\_experimental\\_and\\_numerical\\_study](https://www.researchgate.net/publication/239277534_Behaviour_of_an_automotive_bumper_beam-longitudinal_system_at_40_offset_impact_An_experimental_and_numerical_study)>.
13. Hot Extrusion [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/hot-extrusion>>.
  14. **Deb A, Naravane A, Chirwa EC.** An offset rigid barrier-based test:Equivalence to the insurance institute for highway safety frontal offset impact safety test. Int J Crashworthiness [interaktyvus] International Journal of Crashworthiness, 2006, 281-290 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[https://www.researchgate.net/publication/245314413\\_An\\_offset\\_rigid\\_barrier-based\\_test\\_Equivalence\\_to\\_the\\_Insurance\\_Institute\\_for\\_Highway\\_Safety\\_frontal\\_offset\\_impact\\_safety\\_test](https://www.researchgate.net/publication/245314413_An_offset_rigid_barrier-based_test_Equivalence_to_the_Insurance_Institute_for_Highway_Safety_frontal_offset_impact_safety_test)>.
  15. **B A Constantin, D Iozsa, G Fratila.** Studies about the behavior of the crash boxes of a car body [interaktyvus] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rumunija, 2016, 1-9 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/161/1/012010/pdf>>.
  16. **Kusekar Sambhaji Kashinath, Chunghe Abhijit Balasaheb.** Review of design & analysis of bumper beam in low speed frontal crashes [interaktyvus] International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, ISSN: 2347-6982, Indija, 2014, 27-34 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[http://pep.ijieec.org.in/journal\\_pdf/11-62-140309037227-34.pdf](http://pep.ijieec.org.in/journal_pdf/11-62-140309037227-34.pdf)>.
  17. **Arun Basil Jacob, Arunkumar O.N.** Improving The Crashworthiness Of An Automobile Bumper [interaktyvus] IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Indija, 2016, 67-79 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICETEM/Vol.%201%20Issue%203/37-67-79.pdf>>.
  18. **E.S. Roopesh, L. Bhaskara Rao.** Design and Analysis of an Automotive Frontal Bumper Beam for Low-Speed Crashes [interaktyvus] Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) ISSN: 3159-0040, Indija, 2015, 994-998 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42350721.pdf>>.
  19. **Katkar A.D., Bagi J.S.** Bumper Design Enhancement through Crash Analysis [interaktyvus] International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, ISSN 2349-4476, Indija, 2015, 272-279 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[https://www.researchgate.net/publication/282277958\\_Bumper\\_Design\\_Enhancement\\_through\\_Crash\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/282277958_Bumper_Design_Enhancement_through_Crash_Analysis)>.
  20. **Sonawane, C.R., Shelar, A.L.** Strength Enhancement of Car Front Bumper for Slow Speed Impact by FEA Method as per IIHS Regulation [interaktyvus] Journal of The Institution of Engineers, Indija, 2018 599-606 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40032-017-0365-y>>.
  21. **Muhammad Nasiruddin S. , Hambali A. , Rosidah J. and Widodo W.S. and Ahmad M.N** A Review of Energy Absorption of Automotive Bumper Beam [interaktyvus], International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562, Malaizija, 2017, 238-245 [žiūrėta 2020-09-17]. Prieiga per: <[https://www.researchgate.net/profile/Mohd-Ahmad-7/publication/315099439\\_A\\_Review\\_of\\_Energy\\_Absorption\\_of\\_Automotive\\_Bumper\\_Beam/li](https://www.researchgate.net/profile/Mohd-Ahmad-7/publication/315099439_A_Review_of_Energy_Absorption_of_Automotive_Bumper_Beam/li)

nks/58ca2e05aca27286b3afa8ac/A-Review-of-Energy-Absorption-of-Automotive-Bumper-Beam.pdf>.

22. **J. Šateika, D. Garuckas**, Lengvojo automobilio pusrėmio skersinės sijos deformatyvumo tyrimas [interaktyvus] Technologijų ir verslo aktualijos, ISSN 2538-8045, Lietuva, 2018, 404-410 [žiūrėta 2021-04-20] Prieiga per: < <https://tva.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/312/2021/01/TVA18internet.pdf> >
23. EN 1.4301 (X5CrNi18-10) Stainless Steel, 2020 [interaktyvus] [žiūrėta 2021-04-28]. Prieiga per: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4301-X5CrNi18-10-Stainless-Steel>>.
24. Aluminium / Aluminum 3105 Alloy (UNS A93015), 2012 [interaktyvus] [žiūrėta 2021-04-08]. Prieiga per: < <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6620> >.
25. EN 1.0545 (S355N) Non-Alloy Steel, 2020 [interaktyvus] [žiūrėta 2021-04-28]. Prieiga per: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0545-S355N-Non-Alloy-Steel>>
26. Contact formulations in Abaqus/Standard [interaktyvus] [žiūrėta 2021-05-14] Prieiga per: <<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEITNRefMap/simaitn-c-contactpairform.htm>>.

## Priedai

### 1 priedas. Tyrimų rezultatų suvestinė

**2 lentelė.** Absoliutinių deformacijų bei maksimalių įtempimų kitimas keičiant skersinės pusrėmio sijos medžiagą ir profilio sienelės storį.

Metalas	Sienelės storis, mm	Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
ALU 3105	3	4	5,516	1651
		10	3,835	1101
		15	1,421	484,4
	4	4	1,276	381,5
		10	3,111	1041
		15	4,902	1547
	5	4	1,082	364
		10	2,702	735
		15	4,537	1048
X5CrNi18-10	3	4	1,356	1051
		10	2,995	2157
		15	4,58	3002
	4	4	1,109	1031
		10	2,508	2058
		15	3,952	2623
	5	4	0,9828	542,8
		10	2,235	1033
		15	3,547	1717
S355N	3	4	1,052	1038
		10	2,573	1953
		15	4,271	2684
	4	4	0,9419	525,4
		10	2,371	1023
		15	3,987	2065
	5	4	0,8261	427,3
		10	2,204	624,7
		15	3,431	1008

**3 lentelė.** Absoliutinių deformacijų bei maksimalių įtempimų kitimas keičiant skersinės pusrėmio sijos profilio sienelės storį modifikuotame profilyje.

Metalas	Sienelės storis, mm	Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
ALU 3105	3	4	0,635	160,6

		10	2,367	390
		15	2,782	733
	4	4	0,589	95,9
		10	1,631	359,6
		15	2,152	500,7
	5	4	0,469	86,28
		10	1,472	333,8
		15	1,991	483,2

**4 lentelė.** Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje 2 kartus didesnę tvirtinimo plotą, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm

Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
4	1,231	396,9
10	1,666	497,4
15	1,947	688,9

**5 lentelė.** Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingo storio standumo briaunų tinklėlį, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm

Tinklelio storis, mm	Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
1	4	1,364	285,6
	10	2,680	440,1
	15	3,095	1241
2	4	1,258	243,7
	10	2,296	424,1
	15	2,767	890,6
3	4	1,142	187,3
	10	1,509	394,5
	15	2,419	676,6
4	4	0,918	173,9
	10	1,351	303,0
	15	1,381	486,0

**6 lentelė.** Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingus standumo briaunų kiekius, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm

Standumo briaunų skaičius, vnt.	Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
5	4	1,264	492,4
	10	2,530	659,8

	15	4,441	947,2
10	4	1,112	354,1
	10	1,606	587,7
	15	3,696	753,8
15	4	0,988	295,7
	10	1,130	509,3
	15	2,783	735,4

**7 lentelė.** Absoliutinės deformacijos bei maksimalūs įtempimai skersinėje pusrėmio sijoje turinčioje skirtingas standumo briaunų formas, sijos medžiaga ALU 3105, sienelės storis – 3 mm

Standumo briaunų forma	Greitis, m/s	Absoliutinės deformacijos, mm	Maksimalūs įtempimai, MPa
a	4	1,03	316,7
	10	1,47	565,2
	15	2,98	803,8
b	4	0,85	291,2
	10	1,04	325,2
	15	2,46	781,8