



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Erdvėlaivių dulkių skydo patobulinimas

Baigiamasis magistro projektas

Artiom Nikolajev

Projekto autorius

Doc. Sigitas Kilikevičius

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Erdvėlaivių dulkių skydo patobulinimas

Baigiamasis magistro projektas

Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Artiom Nikolajev

Projekto autorius

Doc. Sigitas Kilikevičius

Vadovas

Doc. Vytautas Dzerkelis

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Artiom Nikolajev

Erdvėlaivių dulkių skydo patobulinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Artiom Nikolajev

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Artiom Nikolajev

1. Projekto tema

Erdvėlaivio dulkių skydo patobulinimas

(Lietuvių kalba)

Improvement of Spacecraft Hypervelocity Shield

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Skaitmeniniu būdu sukurti ir ištirti efektingiausias skydų konfigūracijas ir patobulinti jas.
Uždaviniai:

1. Ištirti skydų veikimo principus ir šiuolaikinių tyrimų metodologiją.
2. Sukurti aukšto greičio dalelės smūgio į skydą skaitinį modelį.
3. Remiantis smūgio skaitinio modelio rezultatais, patobulinti skydų efektyvumą.
4. Nustatyti skydo modelį su aukščiausiais efektyvumo rodikliais.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

- Smūgiuojančios dalelės forma: sferinė.
- Smūgiuojančios dalelės skersmuo: 1, 2, 3 mm.
- Smūgiuojančios dalelės greitis: 3.5, 7, 9 km/s.
- Smūgiuojančios dalelės medžiaga: Al 6061, Al 7075.
- Skydo forma: monolitinė vientisa struktūra, adatos formos struktūra, korio formos struktūra, vieno skydo struktūra, dviejų skydų struktūra.
- Skydo storis: 2, 3, 4 mm.
- Skydo medžiaga: Al2024-T4, Al6061, Al 7075, TI-6AL-4V.
- Didžiausias leistinas skydo įtrūkimas/deformacija po smūgio: 30 mm (skersmuo).
- Didžiausias leistinas skydo masės praradimas po smūgio: 20% (nuo masės iki smūgio).

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Artiom Nikolajev

2023-02-14

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Projekto vadovas

Doc. Sigitas Kilikevičius

2023-02-14

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Doc. Saulius Japertas
(Vardas, Pavardė)

2023-02-14
(Data)

Nikolajev, Artiom. Erdvėlaivių dulkių skydo patobulinimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Hiper-greičio smūgiai, Whipple skydas, Ansys AUTODYN-2D, hidrokodas, SPH metodas, lagranžinis metodas, medžiagos modeliai, Al 6061-T6, Al 7075-T6, Ti-6Al-4V.

Kaunas, 2023. 72 p.

Santrauka

Baigiamasis magistro projektas skirtas skaitinių būdu ištirti patobulintų Whipple skydų ekranavimo nuo didelio greičio smūgių efektyvumą. Whipple skydai naudojami ekranuoti erdvėlaivių korpusus nuo itin aukšto greičio – hiper-greičio (>1 km/s) – kosminių šiukšlių. Šiukšlių dalelėms būdinga suirti į mažų fragmentų formą po smūgio – dalelių debesėlį. Tolimesnis debesėlio smūgis į erdvėlaivio korpusą yra ypač pavojingas dėl galimos medžiagos perforacijos. Ištirta eksperimentinių ir skaitinių Whipple skydų tyrimų literatūra atskleidė, kad efektyviai sumažinti korpuso perforacijos tikimybę reikalingi Whipple skydų struktūrinių savybių patobulinimai. Tokie patobulinimai nutaikyti į didesnę smūgiuojančios dalelės kinetinės energijos absorbciją ir didesnę debesėlio išsiskleidimą prieš smūgį į galinę plokštelę. Šio darbo skaitiniam tyrimui naudojama programa AUTODYN-2D, kurios hidrokodinis funkcionalumas leidžia modeliuoti tikslus medžiagų makro-mechaninius reiškinius didelių deformacijų atvejais. Sukurtuose modeliuose, Whipple skydų plokštelėms ir smūgiuojančiai dalelei taikomas sklandžių dalelių hidrodinaminkos (SPH) skaitinis metodas, kuris atvaizduoja medžiagos terpę taškiniais elementais, ir lagranžinis skaitinis metodas galinei plokštelei, atvaizduojantis medžiagą tinklelių elementais. Smūgiuojančioms dalelėms taikomas aliuminio lydinis Al 6061-T6, skydams taikomi aliuminio Al 7075-T6 ir titano Ti-6Al 4V lydiniai. Nustatyti naudojamų medžiagų savybių tikslumą ir skaitinių metodų atitinkamumą realiems eksperimentams, atliekamas verifikacijos modelis, imituojantis eksperimentinio Whipple skydo tyrimo sąlygas. Modelio rezultatai – dalelių debesėlis, dalelės deformacija ir skydo įtrūkimai – parodė aukštą rezultatų sutapimą su eksperimentinio tyrimo ekvivalentais, ir pagrindžia šio darbo rezultatų aktualumą. Siekiant nustatyti paprasčiausio, vienos plokštelės Whipple skydo efektyvumo kriterijus, atlikti bazinio efektyvumo lygio tyrimai prie skirtingų greičių ir smūgiuojančių dalelių dydžių. Skydų efektyvumo kriterijai apibrėžti kaip galinės plokštelės įtrūkimai po dalelių debesėlio smūgio. Pasirinktos trys tyrimų sąlygos, leidžiančios objektyviai nustatyti skydų efektyvumo prieaugį: 3 mm skersmens dalelės smūgis prie 3.5 km/s greičio, 6 mm prie 7.0 km/s ir 9 mm prie 9.0 km/s. Ištirti tarpinės plokštelės, koreguoto storio, struktūros, medžiagos ir atstumo tarp plokštelių skydų patobulinimai, jie parodė skirtingus efektyvumo prieaugius prie skirtingų tyrimų sąlygų. Siekiant ištirti kaip šių patobulinimų konstrukcinės ypatybės įtakoja efektyvumą, atlikti papildomi tarpinės plokštelės, koreguotos struktūros ir medžiagos patobulinimų tyrimai. Atskleista, kad aukščiausią efektyvumo prieaugį turi tarpinės plokštelės skydas – implementuota antra plokštelė efektyviai sumažino galinės plokštelės įtrūkimus visuose tyrimuose. Tokio skydo struktūrinė savybė – atstumas tarp priekinės ir tarpinės plokštelių – žymiai įtakoja skydo efektyvumą. Antrą ir trečią geriausių prieaugius parodė koreguotos struktūros ir atstumo skydai. Patobulintų skydų plokštelės patyrė didelius įtrūkimus, kurie neigiamai įtakoja jų tolimesnį naudojimą. Siekiant sukurti aukščiausio efektyvumo skydą, ištirti patobulinimai kombinuojami į vieną struktūrą, kurią sudaro dvigubos

(koreguotos) medžiagos priekinė plokštelė ir trijų sekcijų, koreguoto storio, atstumo (nuo priekinės plokštelės) ir struktūros, tarpinė plokštelė. Siekiant sumažinti būdingus tarpinei plokštei įtrūkimus, patobulinimai implementuojami optimaliu būdu – vieno patobulinimo trūkumai koreguojami kito privalumais. Kombinuotų patobulinimų skydas parodė aukštą efektyvumą visuose tyrimuose – tarpinė plokštelė visiškai sustabdė dalelių debesėlį prieš jam pasiekiant galinę plokštelę. Tarpinė plokštelė patyrė nekritinius įtrūkimus mažo ir vidutinio hiper-greičio tyrimuose ir kritinius įtrūkimus didelio greičio. Atliktas papildomas dalelės smūgio į tarpinę plokštelę tyrimas parodė, kaip skydo struktūrinės savybės įtakoja dalelių debesėlio formavimą. Tai pagrindžia tolimesnius šio skydo optimizavimus ir tyrimus.

Nikolajev, Artiom. Improvement of Spacecraft Hypervelocity Shield. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Sigitas Kilikevičius; Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: Hyper-velocity impacts, Whipple shield, Ansys AUTODYN-2D, hydrocode, SPH method, Lagrange method, material models, Al 6061-T6, Al 7075-T6, Ti-6Al-4V.

Kaunas, 2023 72 p.

Summary

This masters thesis is aimed at numerically studying Whipple shield improvements for protection against hyper-velocity impacts. Whipple shields are used to protect the hull of a spacecraft against high-speed space debris impacts. Upon impact, debris particles disintegrate into small fragments – a debris cloud. The following debris cloud's impact into the spacecraft is considered very dangerous, due to the possible penetration of the material. Studied literature shows, that decreasing the probability of such penetration is achieved by improving the structural characteristics of Whipple shields. Such improvements are aimed at increasing the impacting particle's kinetic energy loss and increasing the spread of the resulting debris cloud. This work employs a numerical modelling approach in AUTODYN-2D software – the program's hydrocode functions allow for accurate simulation of material mechanical behaviour under large deformations. In the models, material bodies are assigned with smoothed-particle hydrodynamics computational method, to represent the shield's and the impacting particle's material medium with point-particles, and a Lagrangian mesh element method for the back-plate. Impacting particles are assigned with aluminium alloy Al 6061-T6, shields are assigned with aluminium alloy Al 7075-T6 and titanium Ti-6Al-4V. To determine the appropriateness of applied materials and numerical methods, an impact verification model is created, which imitates an experimental hyper-velocity impact test. The verification model's results – the debris cloud, impacting particle deformation and Whipple shield damage – display high correlation to their experimental counterparts. This establishes the relevancy of this work's results. To determine the effectiveness characteristics of a single-plate Whipple shield, basic effectiveness tests are performed. Effectiveness characteristics are defined as the damage sustained by the backplate after the resulting debris cloud impact. Three tests are chosen to be used with improved shields – the tests' condition allow for an objective measurement of effectiveness increase: 3 mm diameter particle impact at 3.5 km/s, 6 mm at 7.0 km/s and 9 mm at 9.0 km/s. Two-plate, improved thickness, structure, material and spacing shields are investigated – such improvements increased the basic shield's effectiveness in all tests. To establish, how structural parameters of mentioned improvements influence their effectiveness characteristics, additional two-plate, improved structure, and material tests are performed. The tests reveal that the largest effectiveness increase is achieved by utilizing a two-shield structure – the second plate decreases the damage of the back-plate in all tests. The structural characteristic of this shield – distance between the front and the second plate – heavily influences such shield's effectiveness. Improved structure and improved spacing shields were determined to have the second and third highest effectiveness increase, respectively. It was noted, that in all tests, shield plates experienced large damage, which negatively affected their further use. To create the highest effectiveness shield, all five analysed improvements were combined into a single structure. Such shield is comprised of an improved material front-plate, and three-section, improved

thickness, spacing and structure, second plate. To decrease the large damage tendency of the second plate, the mentioned improvements are applied in an optimal way, to compensate one improvement's disadvantages with other's advantages. The combined improvements shield displayed exceptional effectiveness - in all tests, the second plate stopped the debris cloud from impacting the back-plate. The second plate experienced non-critical damage in low- and medium-speed test but received critical damage in the high-speed one. An additional test was made, which revealed how this shield's structural parameters influence debris cloud formation – this warrants further optimization and analysis of the combined improvements shield.

Turinys

Lentelių sąrašas	12
Paveikslų sąrašas	13
Santrumpų ir terminų sąrašas	14
Įvadas.....	19
1. Literatūros apžvalga	20
1.1. Whipple skydai	20
1.2. Hiper-greičio smūgių reiškiniai	21
1.3. Šiuolaikiniai skydų tyrimų metodai.....	22
1.4. Šiuolaikinės skydų pažangos	25
1.5. Literatūros apibendrinimas	27
2. Skydo patobulinimų tyrimas	28
2.1. Skaitinis modelis	28
2.1.1. Lagranžinis metodas	28
2.1.2. SPH metodas	28
2.1.3. Programinė įranga.....	29
2.1.4. Modeliavimo erdvė.....	30
2.2. Medžiagų pasirinkimas.....	30
2.2.1. Medžiagos būsenos modelis Shock (Mie-Grüneisen-Hugoniot).....	32
2.2.2. Medžiagos plastiškumo modelis Johnson-Cook.....	33
2.2.3. Medžiagos irimo modelis Grady spall.....	33
2.2.4. Medžiagos erozijos modelis geometrinė deformacija	34
2.2.5. Verifikacijos modelis.....	35
2.2.6. Verifikacijos modelio rezultatai	36
2.3. Skaitinių modelių sąlygos.....	38
2.3.1. Skydo efektyvumo kriterijai	39
2.4. Bazinio efektyvumo tyrimai	40
2.5. Skydų patobulinimas	42
2.5.1. Tarpinės plokštelės tyrimai.....	42
2.5.2. Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai.....	44
2.5.3. Priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimai.....	45
2.5.4. Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai.....	47
2.5.5. Priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimai	49
3. Skydų patobulinimų tyrimo rezultatai	51
3.1. Tyrimų rezultatų analitika	51
3.2. Tyrimų 3-35 rezultatai	52
3.3. Tyrimų 6-70 rezultatai	54
3.4. Tyrimų 9-90 rezultatai	57
3.5. Tyrimų išvados	59
3.6. Kombinuotų patobulinimų skydas.....	61
3.6.1. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai	62
Išvados	65
Rekomendacijos.....	67

Literatūros sąrašas	69
Priedai.....	74
1 priedas. Verifikacijos modelio plokštelės įtrūkimo matavimo metodas.....	74
2 priedas. Netinkamo SPH elementų skaičiaus paklaida.....	75
3 priedas. Verifikacijos modelio dalelių debesėlio vaizdai ir matmenis 7.2 ir 20.3 μ s laikais.	76
4 priedas. Lagranžinis verifikacijos modelio plokštelės įtrūkimo vietos skerspjūvis.	77
5 priedas. Bazinio efektyvumo tyrimai: visi rezultatai.....	78
6 priedas. Bazinio skydo tyrimai	80
7 priedas. Skydo patobulinimas: tarpinės plokštelės tyrimai	86
8 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai	94
9 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimai	100
10 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai	109
11 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimai.....	116
12 priedas. Skydų masių aptarimas	122
13 priedas. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai, 1 dalis	123
14 priedas. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai, 2 dalis	132

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Darbe naudojami medžiagos modeliai ir jų parametrai	31
2 lentelė. Verifikacijos modelio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas	36
3 lentelė. Efektyvumo kriterijų paaiškinimas	39
4 lentelė. Bazinio efektyvumo tyrimų rezultatai	40
5 lentelė. Tarpinės plokštelės tyrimų rezultatai	43
6 lentelė. Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimų rezultatai	44
7 lentelė. Priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimų rezultatai	46
8 lentelė. Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimų rezultatai	48
9 lentelė. Priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimų rezultatai	50
10 lentelė. Tyrimų 3-35 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai	54
11 lentelė. Tyrimų 6-70 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai	56
12 lentelė. Tyrimų 9-90 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai	59
13 lentelė. Galutinis patobulintų skydų efektyvumo rezultatų palyginimas	61
14 lentelė. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimų rezultatai	62

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kosminių šiukšlių Žemės orbitoje skaičius per metus [5].....	20
2 pav. Whipple skydo veikimo schema (tarpinės plokštelės skydas).....	21
3 pav. Smūgio metu pabrėžiami reiškiniai [18].....	22
4 pav. Dujinės patrankos su diagnostikos prietaisais instaliacija ir dalelių debesėlių fotografijos [53].....	23
5 pav. Kritinis dalelės skersmuo kaip funkcija nuo dalelės greičio (BLE) [24].....	24
6 pav. SPH elementų sąveikavimo regiono atvaizdavimas [55]	29
7 pav. AUTODYN-2D simetriškumo modelis (<i>axisymmetric model</i>).....	30
8 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas. Dalelių debesėlio radiografinės nuotraukos 7.2 ir 20.3 μ s po smūgio [53].....	35
9 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas. Pirmą nuotrauka: plokštelės įtrūkimo vietos skerspjūvis. Antra nuotrauka: plokštelės perforacija [53].....	35
10 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas: dalelių debesėlio matavimo taškai [53].....	36
11 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų nuotraukos ir vaizdai	38
12 pav. Bazinio efektyvumo skydo schema	41
13 pav. Bazinio efektyvumo tyrimų bendri, temperatūros ir galinės plokštelės medžiagos būsenos vaizdai.....	42
14 pav. Tarpinės plokštelės skydo schema.....	44
15 pav. Priekinės plokštelės pakoreguoto storio skydo schema.....	45
16 pav. Priekinės plokštelės pakoreguotos struktūros skydo schema	47
17 pav. Priekinės plokštelės pakoreguotos medžiagos skydo schema	49
18 pav. Priekinės plokštelės pakoreguoto atstumo skydo schema	50
19 pav. Tyrimų 3-35 kinetinės ir vidinės energijos grafikai.....	52
20 pav. Tyrimų 3-35 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai	53
21 pav. Tyrimų 6-70 kinetinės ir vidinės energijos grafikai.....	55
22 pav. Tyrimų 6-70 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai	56
23 pav. Tyrimų 9-90 kinetinės ir vidinės energijos grafikai.....	57
24 pav. Tyrimų 9-90 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai	59
25 pav. Kombinuotų patobulinimų skydo brėžinys ir schema	63
26 pav. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimų vaizdai	64

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

LEO – angl. *low Earth orbit*, žemoji Žemės orbita;

GEO – angl. *geostationary Earth orbit*, geostacionari Žemės orbita;

BLE – angl. *ballistic limit equation*, balistinės ribos lygtis;

SPH – angl. *smoothed particle hydrodynamics*, sklandžios dalelės hidrodinamika;

FE – angl. *finite element*, baigtiniai elementai (skaitinis metodas);

Al/AL – angl. *aluminium alloy*, aliuminio lydinys;

Ti – angl. *titanium/ titanium alloy*, titano lydinys;

EOS – angl. *equation of state*, medžiagos būsenos lygtis/modelis;

JC – angl. *Johnson-Cook*, Johnson-Cook medžiagos modelis (darbe – plastiškumo modelis).

Terminiai:

Kosminės/orbitos šiukšlės – angl. *space debris*, objektai Žemės orbitoje, dažniausiai neeksploatuojami erdvėlaiviai, raketų nuolaužos ir kiti smulki kūnai. Šiukšlės pavojingos erdvėlaiviams, dirbantiems Žemės orbitoje. Kosmose taip pat mikro-meteoritai, kometų dalelės.

Whipple/Dulkių/Hiper-greičio skydas – angl. *Whipple/hypervelocity shield*, pagrindinė erdvėlaivio pasyvosios ekranavimo sistemos dalis. Skydą sudaro metalinių plokštelių struktūra, skirta apsaugoti erdvėlaivį nuo susidūrimų su itin dideliu greičiu judančiomis kosminėmis šiukšlėmis. Pavadintas astronomo Fred Whipple vardu. Darbe vartojamas terminas „Whipple skydas“ apibrėžia priekinę ir/arba tarpinę (antrą) plokšteles (bet ne galinę).

Hiper-greitis (smūgiai) – angl. *hypervelocity (impacts) HVI*, itin aukšto greičio režimas. Smūgiuose prie tokių greičių, kietiesiems kūnams būdingi skysčio reiškiniai/elgesys. Kosminių technologijų srityje tiriamas nuo maždaug 1 km/s. Hiper-greitis yra taip pat aktualus kai kurių karinių technologijų srityse.

Smūgiuojanti dalelė/ smogtuvas – angl. *impacting particle, projectile*, kosminių šiukšlių dalelė, judanti hiper-greičiu. Smūgio metu fragmentuojasi į dalelių debesėlį.

Fragmentavimas – smūgiuojančios dalelės išsiskaldymas į mažesnius fragmentus/daleles, vientisos formos praradimas.

Dalelių debesėlis – angl. *particle/debris cloud*, po smūgio į priekinę plokštelę, dalelė fragmentuojasi į mažus fragmentus. Tokie fragmentai yra debesėlio formos ir juda sekančios plokštelės link (pradinės dalelės trajektorija). Dalelių debesėlio išsiskleidimas, forma, greitis studijuojami. Debesėlį sudaro smūgiuojančios dalelės ir skydo fragmentai.

Balistinės ribos lygtys – nustatytos eksperimentiškai lygtys, parodančios kokio skersmens dalelės prasiskverbs pro tam tikrą Whipple skydo struktūrą.

Bamperis/Priekinė plokštelė – angl. *bumper*, Whipple skydo priekinė (t.y. pirma) plokštelė. Toks terminas dažniausiai naudojamas kai skydo konfigūracijoje yra daugiau nei viena plokštelė ir/arba kai norima atskirti nuo galinės plokštelės. Skirta dalelei fragmentuoti - priekinės plokštelės perforacija yra tikėtinas faktorius.

Galinė plokštelė – angl. *back/rear wall, witness*, galinė plokštelė, uždėdama už priekinės tam tikru atstumu. Tyrimuose imituoja erdvėlaivio korpusą. Whipple skydai naudojami ekranuoti galinę plokštelę nuo dalelių ir dalelių debesėlių smūgių. Skydo efektyvumas nustatomas pagal dalelių debesėlio padarytą žalą galinei plokštei. Darbe galinė plokštelė nelaikoma Whipple skydo dalimi.

Skydo užpildas/tarpinės plokštelės – angl. *shield stuffing*, plokštelės, uždėdamos tarp priekinės ir galinės plokštelių (t.y. antra plokštelė), arba specializuota medžiagos užpildo struktūra, pavyzdžiui, putos formos aliuminio užpildas tarp dviejų, vienos plokštelės, sekcijų.

Skydo perforacija – angl. *penetration, perforation*, skydo efektyvumo kriterijus. Smūgiuojančios dalelės (pilnas arba dalinis) prasiskverbimas pro plokštelę.

Eksperimentinis tyrimas – hiper-greičio tyrimas, kuriuo metu iš dujinės patrankos šaunama į pagamintą Whipple skydą. Naudojamos specializuotos diagnostikos priemonės hiper-greičio smūgio reiškiniams studijuoti.

Skaitinis tyrimas – hiper-greičio tyrimas, atliktas skaitinėje erdvėje, naudojant specializuotas kompiuterines programas smūgio reiškiniams imituoti ir studijuoti.

AUTODYN – programa naudojanti hidrokodą, skirta dinaminiam medžiagų reiškiniams modeliuoti. AUTODYN-2D yra programos AUTODYN modulis, kur dvimačiai modeliai, simetriškai apie X arba Y ašį, naudojami simuliuoti trimačius modelius (nepadidinus kompiuterinių išteklių sunaudojimo).

Hidrokodas – angl. *hydrocode*, speciali kompiuterinė programa/funkcija, naudojama tiksliai medžiagos terpės fiziniams reiškiniams modeliuoti trimatėje erdvėje.

Lagranžinis metodas – darbe: skaitinis medžiagų dinamikos modeliavimo metodas. Naudojamas modeliuojant skirtingus medžiagų fizinius reiškinius, pvz. dviejų kūnų smūgius. Lagranžiniame metode kūnas yra padalinamas į baigtinių elementų tinklą. Elementai atstovauja medžiagos terpei ir perduoda jos savybes savo geometrija. Populiarus metodas skaitiniuose Whipple skydų tyrimuose dėl mažų kompiuterinių išteklių sunaudojimo ir pakankamo tikslumo.

SPH metodas – angl. *smoothed particle hydrodynamics*, darbe: skaitinis lagranžinis betinklelinis modeliavimo metodas. Naudojamos taškinės dalelės (angl. *SPH particles*) atstovauja medžiagai, ir perduoda jos savybes (masę, tankį, temperatūrą, t.t.) per savo sąveikavimo regioną. Gerai tinka medžiagų mechaniniams reiškiniams modeliuoti, pvz., kietųjų medžiagų irimui, fragmentavimui, skysčių modeliavimui. Populiarus metodas skaitiniuose Whipple skydų tyrimuose dėl aukšto tikslumo.

Laiko iteravimas – angl. *time-step*, skaitinio modelio laiko integravimo diskretiška funkcija. Laiko iteravimas nusako per kokį laikotarpį apskaičiuojami visos modelyje vykstančios sąveikos, reiškiniai, diferencialinės lygtys. AUTODYN-2D programoje iteravimas nustatomas automatiškai, pagal mažiausio nesuirusio elemento greitį.

Al 6061-T6 – aliuminio lydinis, dažnai naudojamas aeronautikos ir kosminių technologijų srityse. Lydinis populiarus dėl cheminio stabilumo (ypač atsparumu korozijai) ir gerų mechaninių savybių. Pagal sudėtį: iki 98.6 % Al, iki 1.2 % Mg, iki 0.8 % Si, iki 0.7 % Fe, iki 0.4 % Cu.

Al 7075-T6 – aliuminio lydinis, dažnai naudojamas aeronautikos ir kosminių technologijų srityse. Lydinis populiarus dėl cheminio stabilumo ir labai gerų mechaninių savybių. Pagal sudėtį: iki 91.2 % Al, iki 6 % Zn, iki 2.9 % Mg, iki 2 % Cu.

Ti-6Al-4V – titano lydinis, dažnai naudojamas aeronautikos srityje. Populiarus dėl labai gero cheminio stabilumo ir mechaninių savybių. Pagal sudėtį: iki 91.0 % Ti, iki 6.7 % Al, iki 4.5 % V, iki 0.4 % Fe.

Medžiagos būsenos modelis/lygtis – angl. *equation of state EOS*, medžiagos termodinaminis modelis (lygtis), nusakantis medžiagos tankio, vidinio slėgio ir vidinės energijos funkcinę sąveiką (vidinę medžiagos energiją). Modelis apibrėžia medžiagos agregatinę būseną prie tam tikrų fizinių sąlygų.

Medžiagos plastiškumo modelis – angl. *material strength model*, medžiagos modelis (lygtis), nusakantis medžiagos įtempių ir deformacijos reiškinius. Darbe: Johnson-Cook plastiškumo modelis (angl. *Johnson-Cook strength model*,) yra medžiagos tamprumo modelis dažnai naudojamas Whipple skydų tyrimuose dėl jo parametrų prieinamumo literatūroje ir tikslumo.

Medžiagos irimo modelis – angl. *material failure model*, medžiagos modelis (lygtis), nusakantis plastiškos deformacijos sukeltą medžiagos irimą. Darbe: Grady irimo modelis (angl. *Grady spall failure model*) yra naudojamas Whipple skydų tyrimuose, dėl jo parametrų prieinamumo literatūroje ir tikslumo.

Erozijos modelis – angl. *erosion model*, skaitinio modelio funkcija, automatiškai šalinanti tinklelių elementus. Naudojama išvengti elementų iškraipymą, kuris būdingas itin didelių deformacijų atvejais. Iškraipymo metu tinklelių elementai invertuojasi - toks elementas tampa degeneruotas ir daugiausiai nepalaiko tikslų fizinių savybių/reiškinų. Pabrėžiama, jog erozijos modelis nėra tikrasis fizinis reiškinys, ir naudojamas tik skaitiniuose modeliuose. Dėl erozijos modelio galimos paklaidos (ypač įtrūkimų atvaizdavime).

2D simetriškas (pagal ašį) modelis – angl. *axisymmetrical model*, darbe: AUTODYN-2D modeliavimo erdvės supaprastinimo metodas. Modelis, kuriame dalelė juda normaliai skydo link, kuriamas kaip dvimatis, bet imituoja trimatį (pilną) modelį. Tai sumažina kompiuterinių išteklių sunaudojimą.

Radiografinė fotografija – angl. *x-ray, photography*, diagnostikos metodas, naudojantis Rentgeno spindulius nuotraukas daryti. Naudojamas dalelių debesėlius studijuoti.

Mikrografinė fotografija – angl. *micrography*, diagnostikos metodas, naudojantis mikroskopus nuotraukas daryti. Naudojamas dalelės deformacijas studijuoti.

Tyrimo kodas – tyrimų kategorizavimo būdas. Taikomas siekiant patogiau užfiksuoti ir palyginti atliktų tyrimų rezultatus. Kodas sudaromas pagal tyrimo sąlygas (dalelės skersmenį – dalelės greitį) : tyrimo numerį, kur numeris žymi skirtingus skydų patobulinimus.

Tyrimo(-ų) sąlygos – smūgiuojančios dalelės skersmuo ir greitis. Darbe naudojamos trys sąlygos: 3 mm skersmens dalelės smūgis prie 3.5 km/s, 6 mm prie 7.0 km/s ir 9 mm prie 9.0 km/s. Sąlygos žymimos 3-35, 6-70, 9-90, atitinkamai.

Standartinis tyrimas – patobulintų skydų tyrimas, kuriam netaikoma papildomą konstrukcinių ypatybių korekciją.

Papildomas tyrimas – patobulintų skydų tyrimas, kuriam taikoma papildomą konstrukcinių ypatybių korekciją.

Bazinis efektyvumo lygio/skydo tyrimas – bazinio skydo (vienos aliuminio plokštelės) tyrimas prie tam tikrų tyrimų sąlygų. Toks efektyvumo lygis naudojamas skydų patobulinimų rezultatus pagrįsti.

Efektyvumo kriterijus – skydo arba galinės plokštelės kategorizavimas pagal įtrūkimus, susiformavusius po dalelės/ dalelių debesėlio smūgio. Įtrūkimų (perforacijos) gylis žymimas d_h [mm], skersmuo - d_d [mm]. Patobulintų skydų efektyvumui nustatyti taip pat naudojamas likęs po smūgio galinės plokštelės storis Δd_h , ir galinės plokštelės įtrūkimo skersmuo, normalizuotas pagal bazinio skydo vertę Δd_d .

Kritinis įtrūkimas – įtrūkimas, po kurio tolimesnis skydo naudojimas būtų neefektyvus/neoptimalus. Šitame darbe kritiniais įtrūkimais laikomi: dalinė perforacija, kai smūgio vietoje susiformavo gylus krateris (~70% viso plokštelės storio); pilna perforacija; bet koks įtrūkimas, jei medžiaga atitrūko nuo skydo galinio paviršiaus - spaliacija.

Minimalūs įtrūkimai – po smūgio plokštelės paviršiuje susiformavę maži įtrūkimai: įbrėžimai, grioveliai ir pan. Darbe laikomi nekritiniais įtrūkimais

Dalinė perforacija – dalelės/ dalelių debesėlio dalinis prasiskverbimas (įsiskverbimas) pro plokštelę, po kurio plokštelėje lieka kraterio formos įtrūkimas. Dalinės perforacijos atveju matuojamas didžiausio įtrūkimo skersmuo ir gylis. Priklausomai nuo žalos, gali būti laikomas kritiniu arba nekritiniu įtrūkimu. Kalbant apie minimalius arba dalinės perforacijos įtrūkimus, terminai „įtrūkimas“ ir „krateris“ vartojami kaip sinonimai.

Pilna perforacija – pilnas dalelės/ dalelių debesėlio prasiskverbimas pro plokštelę, po kurio plokštelėje lieka skylė (perforacija). Pilnos perforacijos atveju matuojamas įtrūkimo skersmuo. Darbe laikoma kritiniu įtrūkimu.

Kinetinė energija – kūno judesio (masės ir greičio) energija. Patobulintų skydų efektyvumui nustatyti, naudojamas smūgiuojančios dalelės kinetinės energijos praradimas po smūgio į skydą $E_{k_{d\ loss}}$ [J], ir normalizuotas (energijos praradimas) pagal bazinio skydo vertę $\Delta E_{k_{d\ loss}}$.

Vidinė energija - darbe: kūno vidinė termodinaminė energija (temperatūros, vidinio slėgio sąveika). Vidinės ir kinetinės energijos suma sudaro visą energiją. Patobulintų skydų efektyvumui nustatyti, naudojama priduta galinei plokštei visa energija po smūgio $E_{tot_{gp}}$ [J], ir normalizuota pagal bazinio skydo vertę $\Delta E_{tot_{gp}}$.

Išmušta/atitrūkusi nuo skydo medžiaga – angl. *ejecta*, *spall*, smūgio metu atitrūkusi nuo skydo medžiaga. Išmušta iš skydo medžiaga sudaro dalelių debesėlį (kartu su dalelės fragmentais). Žymint

įtrūkimą, kai nuo plokštelės galinio paviršiaus atitrūksta medžiagos sluoksnis, naudojamas terminas „spaliacija“ (nuo angl. *spallation*). Didelės spaliacijos atveju, medžiagos vientisumo praradimas gali būti laikomas kritiniu – tokia plokštelė laikoma pilnai perforuota.

Skydo struktūrinės savybės/konfigūracija – skydo plokštelių skaičiaus, plokštelių formos, išdėstymo, atstumo tarp plokštelių, medžiagos ir kitų konstrukcinių parametru suma, sudaranti tam tikrą Whipple skydo struktūrą.

Skydo/plokštelių koregavimas – šitame darbe: priekinės arba tarpinės plokštelių struktūrinių savybių patobulinimas/koregavimas. Pakoreguotos plokštelės lyginamos su bazinio efektyvumo skydu.

Atstumas tarp plokštelių – angl. *spacing*, atstumas tarp skydo plokštelių, t.y. tarp priekinės ir antros, arba priekinės ir galinės plokštelių. Matuojamas tarp plokštelių priekinių paviršių.

„Kanalo“ efektas – angl. *channeling*, dalelių debesėlio formavimo fenomenas, kai smūgio metu, dėl skydo struktūros, debesėlis nukreipiamas nuo trajektorijos arba jam priduodama nestandartinė (palankesnė) forma.

Įvadas

Pastaraisiais metais kosminių šiukšlių skaičius Žemės orbitoje padaugėjo. Šiukšlės yra pavojingos erdvėlaiviams ir palydovams, skraidantiems Žemės orbitoje ir išvykstantiems iš jos. Net mažos tokių šiukšlių dalelės susidūrimas su erdvėlaiviu gali turėti katastrofiškų pasekmių dėl didelių šių šiukšlių greičių – hiper-greičių (angl. *hyper-velocity*). Siekiant sumažinti tokių susidūrimų pavojų, erdvėlaiviuose naudojamos ekranavimo struktūros - Whipple skydai – kurios, fragmentuojant smūgiuojančias daleles, sumažina žalą erdvėlaivio korpusui. Bazinę tokio skydo struktūrą sudaro metalinė plokštelė, kuri uždedama tam tikru atstumu nuo erdvėlaivio korpuso. Susidūrimo metu, smūgiuojančios dalelės fragmentuojasi į debesėlį, taip padalinus taškinę smūgio apkrovą per didesnę plotą. Šiuolaikiniai tyrimai parodo, kad optimalus skydų efektyvumo prieaugis pasiekiamas per skydų struktūrinių ir medžiaginių savybių koregavimą. Whipple skydų tyrimuose plačiai naudojamos kompiuterinės programos hiper-greičio smūgiams modeliuoti. Tokiems skaitiniams modeliams reikalingos tikslios medžiagų savybės ir atitinkami modeliavimo metodai. Skydų efektyvumas tobulinamas koreguojant skydų plokštelių skaičių, išdėstymą, formą, jų medžiagą. Skaitiniai tyrimai parodo gerą rezultatų sutapimą su eksperimentiniais ekvivalentais, ir gali būti naudojami pagrįsti tolimesnius skydų tyrimus.

Darbo tikslas: ištirti skaitiniu būdu Whipple skydų patobulinimus.

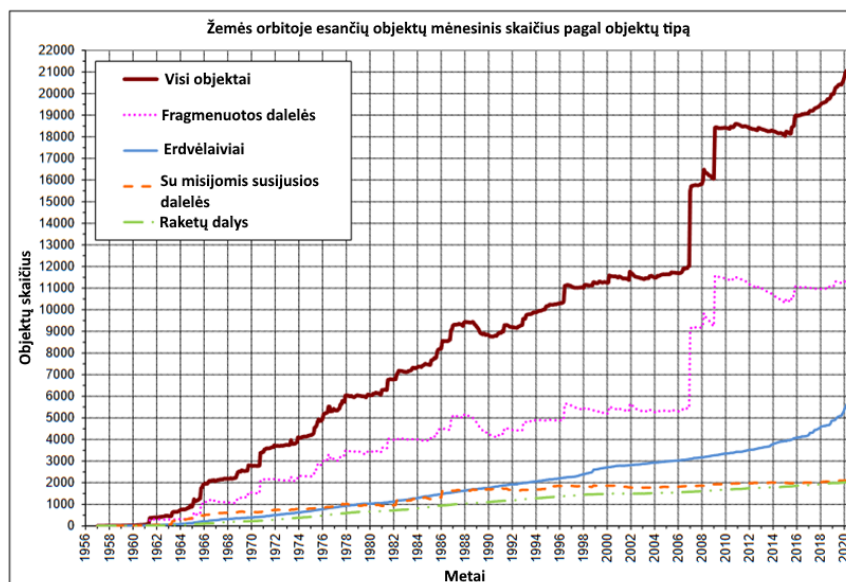
Darbo uždaviniai:

1. ištirti skydų veikimo principus ir šiuolaikinių tyrimų metodologiją;
2. sukurti aukšto greičio dalelės smūgio į skydą skaitinį modelį;
3. remiantis smūgio skaitinio modelio rezultatais, patobulinti skydų efektyvumą;
4. nustatyti skydo modelį su aukščiausiais efektyvumo rodikliais.

Darbui atlikti, AUTODYN 2-D programinėje įrangoje modeliuojami sferinės formos dalelių smūgiai į Whipple skydus prie hiper-greičių. Atliekamas verifikacijos modelis, imituojantis eksperimentinio tyrimo sąlygas. Verifikacijos modelis parodo gerą rezultatų koreliaciją su eksperimentinio tyrimo ekvivalentais. Darbe nagrinėjamuose modeliuose, į Whipple skydus smūgiuojama dalelėmis, judančiomis hiper-greičiu – 3.5, 7.0 ir 9.0 km/s. Dalelėms naudojamas aliuminio lydinis Al 6061-T6, skydams – aliuminio Al 7075-T6 ir titano Ti-6Al-4V lydiniai. Modeliuojamos dalelės yra 1, 2, 3, 6 ir 9 mm skersmens. Nustatyti trys bazinio efektyvumo tyrimai, kurių sąlygos taikomos patobulintų skydų tyrimuose. Patobulintų skydų efektyvumas lyginamas su bazinio skydo efektyvumu. Lyginami efektyvumo parametrai yra galinės plokštelių įtrūkimai, dalelės energijos praradimas po smūgio ir galinės plokštelės energijos faktoriai. Skydams ir dalelėms modeliuoti naudojami SPH ir lagranžinis skaitiniai metodai. Vadovaujantis gautais efektyvumo rezultatais, atskleidžiama, kad tarpinės plokštelės, struktūros ir atstumo patobulinimai parodo aukščiausią efektyvumo prieaugį. Kombinuojant patobulinimus, pristatomas ir tiriamas aukščiausio efektyvumo skydas.

1. Literatūros apžvalga

Per pastaruosius dešimtmečius misijų kosmose ir Žemės orbitoje padaugėjo [1, 2, 3]. Tai paskatino spartų daugelio kosminių technologijų sričių vystymąsi. Ypač greitai pradėjo vystytis erdvėlaivių ekranavimo technologijų sritis, kurioje siekiama atrasti naujus ir efektyvius būdus apsaugoti erdvėlaivius nuo susidūrimų su kosminėmis šiukšlėmis. Šios srities plėtra skatinama jau minėtu padidėjusiu misijų kosmose skaičiumi, kadangi vis daugiau šiukšlių atsiduria Žemės orbitoje – tai kelia didelį pavojų erdvėlaiviams ir palydovams (žr. 1 pav.) Žemės orbitoje tokias šiukšles sudaro: neeksplloatuojami erdvėlaiviai, nešančiųjų raketų dalys, metalinės dalelės ir pan. [4, 5, 6].



1 pav. Kosminių šiukšlių Žemės orbitoje skaičius per metus [5]

Pagrindinis erdvėlaivio susidūrimo su kosminėmis šiukšlėmis pavojus – itin dideli greičiai, pavyzdžiui, >3 km/s palydovų, >7 km/s Tarptautinės kosminės stoties (angl. *International Space Station, ISS*) ir dar didesni erdvėlaivių kosmose greičiai [4, 6]. Tokių greičių režimas (>1 km/s) vadinasi hiper-greičiu (angl. *hyper-velocity*).

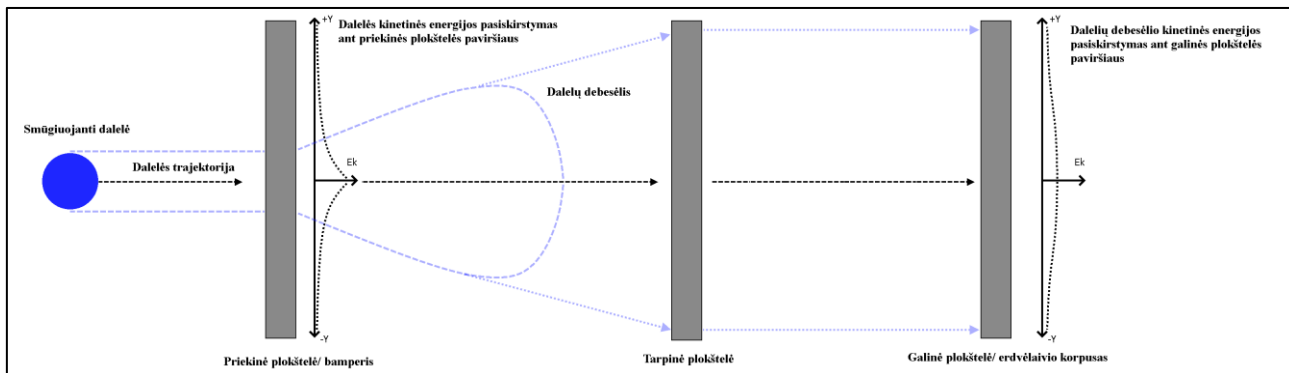
Šiukšlės yra suskirstytos į kategorijas pagal jų dydį: <1 mm dalelės, 1 mm – 10 cm, ir >10 cm objektai. Didesni objektai juda mažesniais greičiais, bet sukelia didesnę žalą smūgio metu. Tyrimai rodo, kad orbitoje esančias šiukšlių daleles dažniausiai sudaro aliuminio, aliuminio oksido, plieno ir dažų dalelės [6]. Svarbu žinoti šiukšlių sudedamąsias medžiagas, kadangi medžiagų savybės lemia medžiagų fizinius reiškinius smūgio metu. Be to, susidūrimų tikimybė LEO orbitoje (2 000 km) yra didesnė palyginus su GEO ($\sim 35\,800$ km), kadangi LEO orbitoje yra daugiau dirbtinių palydovų [6]. Tyrimai atskleidžia, jog tikimybė erdvėlaiviui žlugti eksploatacijos metu dėl susidūrimo su kosminėmis šiukšlėmis išaugs daugiau nei 100 % iki 2055 metų (nuo ~ 3.9 iki 8 %) [7]. Tokios prognozės pabrėžia erdvėlaivių ekranavimo technologijų ir orbitoje esančių šiukšlių pašalinimo poreikį.

1.1. Whipple skydai

Apginti nuo hiper-greičio smūgių, erdvėlaiviuose yra įrengtos aktyvios ir pasyvios ekranavimo sistemos. Aktyvią sistemą sudaro manevrai ir šiukšlių naikinimas prieš įvykstant smūgiui [1, 3]. Tokia sistema naudojama išvengti didesnių dalelių (>10 cm), kadangi jos yra pakankamai lengvai

stebimos ir kataloguojamos. Susidūrimas su tokio didžio objektu garantuotai sunaikins erdvėlaivį. Išvengti mažesnių dalelių (1 mm – 10 mm) yra sudėtingiau, kadangi jas sunkiau stebėti nors jų orbitoje yra daugiau. Aktyviai išvengti tokių dalelių būtų pernelyg neekonomiška [1, 6].

Pasyvioji sistema yra iki šiol efektingiausias metodas ekranuoti erdvėlaivį nuo susidūrimų su mažesniais objektais. Tokią sistemą sudaro plokštelė, uždėta ant erdvėlaivio, tam tikru atstumu nuo korpuso. Plokštelės tikslas – sumažinti žalą korpusui, fragmentuojant šiukšlių daleles, kritiškai nepadidinus erdvėlaivio masės ir tūrio [8, 9, 6].



2 pav. Whipple skydo veikimo schema (tarpinės plokštelės skydas)

Hiper-greičio skydą (angl. *hyper-velocity shield*) sukūrė astronomas Fred Whipple. Jis pasiūlė uždėti ant erdvėlaivio korpuso metalinę plokštelę [10]. Tokio skydo veikimo principas pagrįstas tuo, kad skydą dideliu greičiu smūgiuojančios dalelės fragmentuojasi į mažesnes [11, 12]. Nors fragmentų kinetinė energija po smūgio vis dar išlieka aukšta, energija yra pasiskirstoma per didesnę plotą. Tai paverčia pradinę dalelės smūgį paveikti erdvėlaivio korpusą per didesnę plotą (žr. 2 pav.). Tai sukels mažesnę žalą [13].

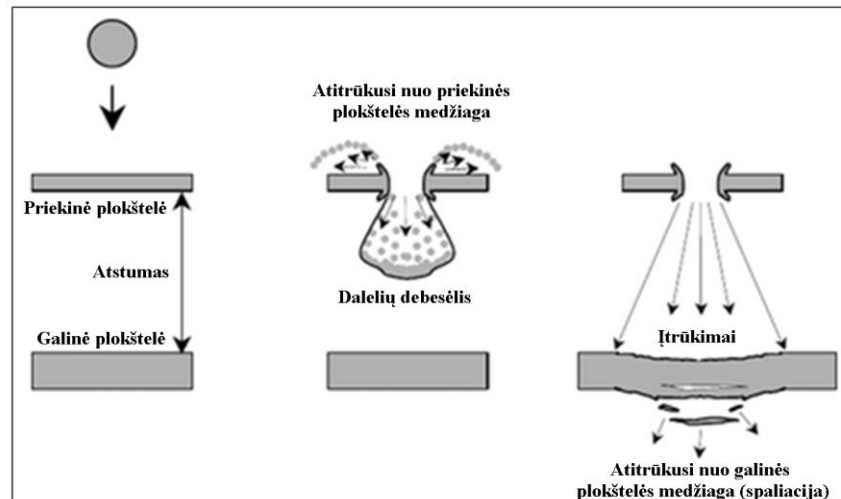
1.2. Hiper-greičio smūgių reiškiniai

Skydo priekinė plokštelė (taip pat vadinama bamperiu, nuo angl. *bumper*) skirta fragmentuoti smūgiuojančią dalelę į mažesnių fragmentų debesėlį (angl. *debris cloud*, toliau – dalelių debesėlis). Toks debesėlis juda sekančios plokštelės link. Debesėlyje formuojasi regionai su skirtingomis fragmentų koncentracijomis. Whipple skydų tyrimuose pabrėžiami trys fiziniai reiškiniai (žr. 3 pav.) hiper-greičio smūgio metu:

1. Smūgiuojančios dalelės sąveikia su priekine plokšte: priklausomai nuo greičio, kampo, priekinės plokštelės medžiagos ir struktūrinių savybių, smūgio metu, dėl staigios didelės deformacijos, dalelė fragmentuojasi į mažesnių dalelių debesėlį [14]. Jei priekinė plokštelė yra pilnai perforuojama smūgio metu, susiformavęs dalelių debesėlis juda sekančios plokštelės link.
2. Dalelių debesėlio formavimas: tolimesnis dalelių debesėlio formavimas ir judėjimas priklauso nuo smūgiuojančios dalelės formos, greičio, skydo struktūrinių savybių. Atstumas tarp priekinės plokštelės ir kito paviršiaus (angl. *spacing*) (kitos plokštelės arba erdvėlaivio korpuso) lemia, kiek dalelių debesėlis išsiskleis prieš pasiekiant erdvėlaivio korpusą [15]. Didesnis išsiskleidimas yra optimalus, kadangi tai padalina pradinę taškinę apkrovą per didesnę plotą.
3. Dalelių debesėlio smūgis į korpusą: debesėlis smūgiuoja į erdvėlaivio korpusą, o padaryta korpusui žala ir kiti efektyvumo kriterijai (pvz. dalelės kinetinės energijos praradimas, plokštelių

įtrūkimų dydžiai) parodo skydo efektyvumo lygį. Kuriamos balistinės ribos lygtys (angl. *ballistic limit equations BLE*) [3, 16], kurios parodo, kokio dydžio dalelės prasiskverbs pro tam tikrą skydo struktūrą. Skaitiniuose tyrimuose taip pat tiriami dalelės energijos (kinetinė, vidinė), skydo įtrūkimų dydžiai, dalelių debesėlių formavimas.

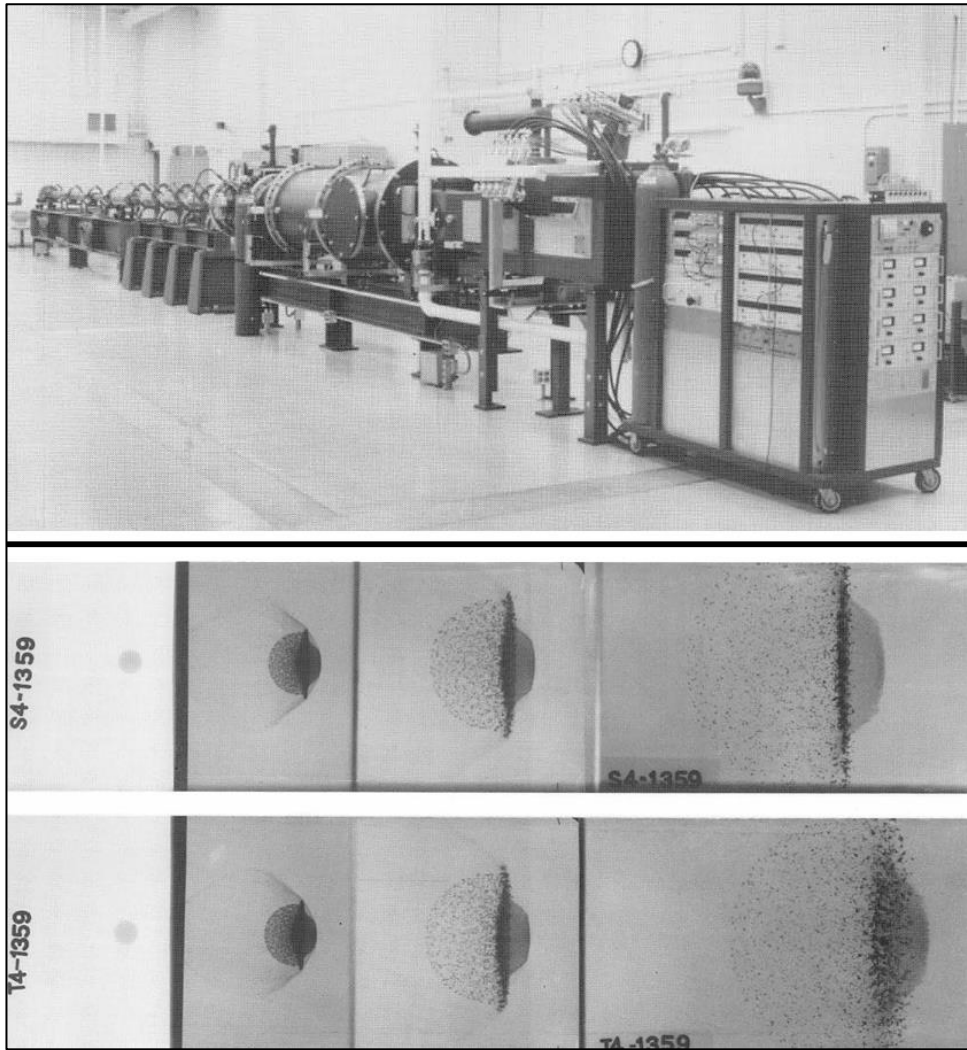
Skydo įtrūkimai apibrėžiami kaip dalelių perforacija pro skydą ir medžiagos atitrūkimas (angl. *spalling/spallation*) nuo skydo paviršiaus [3, 17]. Medžiaga, atitrūkusi nuo skydo, lieka Žemės orbitoje kaip kosminės šiukšlės. Whipple skydo struktūros padidina erdvėlaivio masę ir tūrį. Didinant atstumą tarp skydo plokštelių, naudojant storesnes, sunkesnes plokšteles, gali kilti sunkumų naudojant raketų vietas krovinio skyriuje [6].



3 pav. Smūgio metu pabrėžiami reiškiniai [18]

1.3. Šiuolaikiniai skydų tyrimų metodai

Nustatyti Whipple skydo efektyvumą naudojami skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai [19]. Eksperimentiniams tyrimams gaminami Whipple skydai, į juos šaunama atitinkamo didžio dalelėmis. Dalelės šaunamos iš specialių dujinių patrankų, kurios, kaip parodo tyrimai [2, 20], gali priduoti dalelėms greitį iki 14 km/s. Eksperimentiniuose tyrimuose naudojami šiuolaikiniai diagnostikos ir analizavimo prietaisai: aukšto greičio kameros, radiografinė, mikrografinė fotografija (angl. *X-ray photography/radiography*) dalelės, skydo deformacijos reiškiniams ir dalelių debesėlio (žr. 4 pav.) formavimui užfiksuoti [53].



4 pav. Dujinės patrankos su diagnostikos prietaisais instaliacija ir dalelių debesėlių fotografijos [53]

Kitas būdas tyrinėti skydus yra kompiuterinės programos, naudojančios specializuotas skaitines funkcijas – hidrokodą (angl. *hydrocode*). Tokios funkcijos reikalingos aukšto tikslumo fiziniams medžiagų reiškiniams modeliuoti. Vienas iš populiariausių skaitinių modeliavimo metodų yra sklandžios dalelės hidrodinamiką SPH (angl. *smoothed particle hydrodynamics*), taip pat naudojami dirbtiniai neuroniniai tinklai (angl. *artificial neural networks, ANN*), lagranžiniai, oileriniai ir kiti metodai [21].

Skaitiniuose modeliuose naudojamos atitinkamos skydų ir dalelių medžiagos ir struktūros, o daleliams galima pridėti didesnę greitį nei eksperimentiniuose tyrimuose. Skaitiniam metodui būdingi trūkumai: pažangesnėms skydų struktūroms modeliuoti reikalingi geresni kompiuteriniai ištekliai, neaiškumai taikant fizines medžiagų savybes, nefizinių (skaitinių) reiškinų paklaidos. Skaitinis metodas yra patogus ir prieinamas būdas nustatyti pradinį skydo efektyvumą, kuris gali būti naudojamas pagrįsti tolimesnius skydo patobulinimus ir tyrimus [22, 23]. Skaitinių skydų modeliai, demonstruojantys gerą efektyvumą, gaminami ir testuojami eksperimentiškai. Hiper-greičio smūgių tyrimuose dažnai naudojami rutuliuko formos sviediniai iš aliuminio. Skaitiniuose tyrimuose, rutuliuko formos simetriškumas leidžia naudoti supaprastintą dvimatį modelį, kuris sunaudoja mažiau kompiuterinių išteklių negu trimatis (pilnas) modelis. Aliuminis yra dažniausiai pasitaikanti kosminių šukšlių medžiaga, bet taip pat naudojami ledo, plieno, akmens sviediniai.

Tyrinėjant skydų efektyvumą pabrėžiamos balistinės ribos lygtys (BLE). Šios lygtys nustato kokio dydžio dalelės (dar vadinamos kritinės dalelės), judančios tam tikru greičiu, prasiskverbs pro tam tikrą skydo struktūrą (žr. 5 pav.). Pavyzdžiui, vienos plokštelės skydo kritinis dalelės skersmuo apskaičiuojamas pagal (1) formulę [24, 31]:

$$d_p = 3.9178 \cdot (t_w)^{\frac{2}{3}} \cdot (\rho_p)^{-\frac{1}{3}} \cdot (\rho_p)^{-\frac{1}{9}} \cdot (v_n)^{-\frac{2}{3}} \cdot (S)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{70}\right)^{1/3} \quad (1)$$

čia d_p – kritinis dalelės skersmuo [cm];

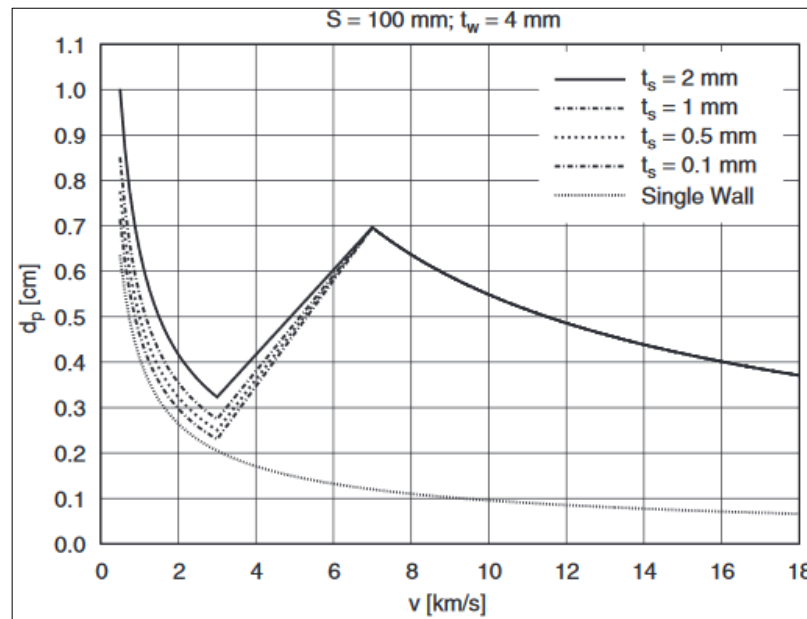
t_w – galinės plokštelės storis [cm];

ρ_p – dalelės medžiagos tankis [g/cm³];

v_n – dalelės greitis [km/s];

S – atstumas tarp plokštelių [cm];

σ_w – korpuso medžiagos takumo riba [ksi].



5 pav. Kritinis dalelės skersmuo kaip funkcija nuo dalelės greičio (BLE) [24]

Paminėta formulė (1) naudojama aliuminio plokštelių skydo efektyvumui nustatyti smūgiuose virš 7 km/s, bet kitoms struktūroms ir greičiams taip pat išvestos lygtys [24, 25, 31].

Hiper-greičio režime pabrėžiami trys greičių regionai/ribos, kuriems būdingi skirtingi reiškiniai smūgio metu [31]. Nuo 1.0 iki maždaug 3.0 km/s yra balistinio greičio regionas - dalelėms, judančioms tokiais greičiais, būdinga po smūgio išlaikyti vientisą struktūrą, t.y. dalelės fragmentuojasi ir išsiskleidžia mažai.

Greičiai tarp 3.0 ir maždaug 7.5 km/s laikomi tarpinio/fragmentavimo greičio regionu. Tokiais greičiais smūgiuojančioms dalelėms būdingas suirimas į mažų fragmentų debesėlį. Dalelių debesėlį

sudaro skydo ir dalelės medžiaga. Fragmentai koncentruojasi skirtinguose dalelių debesėlio regionuose, po smūgio jiems būdingas išsiskleidimas (iš paminėtų regionų).

Greičiai virš 8.0 km/s laikomi lydymosi greičio regionu. Dalelėms ir skydo medžiagai būdingas dalinis arba pilnas išlydimas smūgio metu, bet taip pat formuojasi dalelių debesėlis. Debesėlio regionai yra mažiau struktūruoti nei prie kitų greičių regionų smūgių.

1.4. Šiuolaikinės skydų pažangos

Siekiant sukurti aukšto efektyvumo skydą, tobulinamos skydų struktūrinės savybės. Vientisa aliuminio plokštelė yra lengvai pagaminama ir naudojama erdvėlaiviuose, bet šiuolaikiniai tyrimai parodo kaip galima patobulinti tokį skydą, siekiant kuo efektyviau apsaugoti erdvėlaivius.

Dauguma šiuolaikinių tyrimų nutaikyti į pažangesnių struktūrų išradimą ir tyrimą. Taip, pavyzdžiui, Wen et al. [26] sukūrė ir ištyrė N-formos skydą. Toks skydas naudoja tris plokšteles, išdėstytas raidės „N“ forma. Wen et al. atliko eksperimentinius tyrimus, kur į N-formos skydą buvo smūgiuojama 5.0 mm skersmens dalele prie 4.80 km/s greičio. Lyginant su identiško storio, trijų lygiagrečiai išdėstytų plokštelių skydu, N-formos skydas parodė geresnį dalelių debesėlio išsiskleidimą: galinės plokštelės žalos plotas padidėjo nuo 491 iki 901 mm², įtrūkimų gylis taip pat sumažėjo (gylis nebuvo matuojamas, užfiksuotas vizualiai). N-formos skydas sumažino galinės plokštelės perforacijos riziką, nepadidinus skydo masės.

Liu et al. [27, 28] ir Deconinck et al. [19] demonstravo korio formos skydus, ir jų struktūrinius parametrus, kurių koregavimas leidžia didinti skydų efektyvumą prie skirtingų hiper-greičio režimų. Smūgio metu, dalelėms būdingas „kanalo“ efektas, kur debesėlis verčiamas judėti vienos ar kitos korio akutės link. Tokį efektą galima išnaudoti, paverčiant dalelių debesėlį išsiskleisti daugiau. Korio formos struktūra leidžia kontroliuoti dalelių debesėlio tolimesnį judėjimą po smūgio.

Silnikov et al. [29] skaitiniu būdu sukūrė ir ištyrė adatos formos skydą (aliuminis Al 6061-T6). Paprastos, vienos plokštelės priekiniam paviršiui buvo suteikta ilgų, cilindrinų išpjovimų forma. Adatų ilgis sudarė 50 mm, skersmuo 0.31 mm, atraminės plokštelės storis – 3.1 mm (t.y. viso skydo storis 53.1 mm). Tyrimai parodė, jog tokio skydo svoris yra 3-4 kartus mažesnis nei ekvivalentiško storio vienos plokštelės skydo. Jų adatos formos skydas parodė identišką vienos plokštelės skydai efektyvumą prie normalaus smūgio (nulinis smūgio kampas) ir smūgiuojant 5 laipsniais (nuo normalaus smūgio). Silnikov et al. siūlo naudoti aliuminio oksido nano-šerius (angl. *alumina nanowhiskers*) adatoms pagaminti, kadangi šios medžiagos struktūrinės savybės yra geresnės už aliuminio. Be to, aliuminio oksido didesnis tankis (tuo tarpu ir masė, lyginant su aliuminiu) koreguojama anksčiau paminėta, tokiam skydai būdinga, mažesne mase.

Zhang et al. [30] sukūrė ir ištyrė „kiaušinių dėžutės“ formos skydą. Toks skydas parodė gerą efektyvumą dalelių debesėlio formavime. Lyginant su vienos plokštelės skydu, „kiaušinių dėžutės“ skydai būdinga didesnė smūgiuojančios dalelės energijos absorbcija, be to, toks skydas mažiau fragmentuojasi, kas sumažina dalelių debesėlio fragmentų skaičių.

Kita skydų tobulinimo kryptis – pažangesnių medžiagų naudojimas. Aliuminio lydinių plokštelės yra populiarus pasirinkimas Whipple skydams, dėl šio metalo prieinamumo, aktualumo kosminių technologijų srityje, tinkamų ir tiksliai nustatytų medžiaginių savybių. Šiuolaikiniai tyrimai parodo kitų, pažangesnių medžiagų efektyvumą: taip pavyzdžiui, titano [16, 33] naudojimas leidžia

sumažinti medžiagos spaliacijos fenomeną, tai yra sumažinti medžiagos atitrūkimą nuo plokštelės. Kaip parodė Zhang [16] tyrimas, titano ir nailono derinio plokštelė suteikia dalelių debesėliui palankesnę formą, lyginant su aliuminio plokštele – debesėlio fragmentai išsiskleidė daugiau, ir nebuvo koncentruoti debesėlio centre. Tai sumažino galinės plokštelės įtrūkimus.

Kim et al. [32] sukurtas „žuvies žvyno“ formos aliumininis skydas parodė prastus efektyvumo rezultatus, bet implementavus ploną, didesnio tankio SUS304 (plieno lidynio) plokštelę į tokio skydo struktūrą, jie sugebėjo padidinti skydo efektyvumą: patobulinto „žuvies žvyno“ skydo plokštelė patyrė mažesnę atitrūkimą nuo atraminės struktūros.

Ren et al. [34, 35] ištyrė „energetinio“ aliuminio-politetrafluoroetileno (angl. *polytetrafluoroethylen*) derinio skydą. Tokiai medžiagai būdingas didelis šokinės bangos formavimas (dėl staigaus energijos išmetimo smūgio metu, toks reiškinyms panašus į mažą sprogamą). Jų tyrimas atskleidė, kad tokių „energetinės“ (politetrafluoroetileno) ir „inertinės“ (aliuminio) medžiagų derinys padidina dalelės fragmentavimą smūgio metu. Tai padidino dalelių debesėlio išsiskleidimą ir sumažino galinės plokštelės įtrūkimus (nuo pilnos perforacijos iki dalinės).

Huang et al. [36] pademonstravo titano ir boro Ti-B₂ medžiagos derinį Whipple skydams. Lyginant su aliuminiu, tokia medžiaga parodo geresnį rezultatą atvejuose, kur skydai naudojami tik viena plokštelė. Toks skydo efektyvumas pagrįstas padidintu dalelės fragmentavimu, kadangi titano tankis yra didesnis už aliuminio – tai paverčia dalelę fragmentuotą daugiau.

Wen et al. [12] ištyrė tris Whipple skydus su dvigubos medžiagos deriniais: aliuminio-poliuritano, aliuminio-medienos, aliuminio-aerogelio/stiklo pluošto. Jų tyrime buvo sukurti keturi skydai: standartinis Whipple skydas (priekinė ir tarpinė plokštelės buvo vientisos aliuminio plokštelės) ir tris paminėti dvigubos medžiagos skydai - tokiuose skyduose dvigubos medžiagos plokštelė buvo uždėta po priekinės, aliuminio plokštelės. Eksperimento metu buvo užfiksuojami galinės plokštelės įtrūkimai, o rezultatai parodė, kad priekinės aliuminio ir tarpinės dvigubos medžiagos plokštelių skydas yra efektyvesnis už dviejų aliuminio plokštelių. Lyginant su dviejų aliuminio plokštelių galinės plokštelės 9 mm skersmens įtrūkimu, poliuritano derinio galinė plokštelė patyrė 1 mm skersmens įtrūkimą, medienos ir aerogelio derinių skydų plokštelės nepatyrė įtrūkimų. Dviejų aliuminio plokštelių ir dvigubos medžiagos skydai turėjo vienodą storį (priekinė plokštelė – 1 mm, tarpinė – 2.0 mm).

Ren et al. [38] tyrė NbC/Al₂O₃ derinį: tokia medžiaga sumažina dalelių debesėlio greitį ir debesėlio formavimą dėl formuojančios šokinės bangos dalelės viduje. Tai padidina vidinį dalelės slėgį, kas paverčia ją fragmentuotą daugiau. Tyrinėtojai atskleidė, kad NbC/Al₂O₃ derinio skydas sumažina debesėlio kinetinę energiją - sumažina jo greitį.

Huang et al. [39] pateikė Whipple skydo struktūrą, sustiprintą amorfiniu geležies-pagrindu sluoksniu. Toks skydas yra efektyvesnis už vienos plokštelės skydą, ypač prie mažesnių hiper-greičių (apie 3.5 km/s). Smūgis į amorfinę medžiagą padidina šokinį slėgį smūgiuojančioje dalelėje – tai paverčia daugiau dalelės fragmentų iššlydyti. Tyrinėtojai pabrėžia, kad tokios amorfinės medžiagos skydo pagaminimas yra sudėtingas, ir reikalauja tolimesnių patobulinimų.

1.5. Literatūros apibendrinimas

Ištirta literatūra atskleidžia, jog Whipple skydas yra efektyvus ir ekonomišką būdą apsaugoti erdvėlaivius nuo mažų kosminių šiukšlių dalelių, judančių labai dideliais greičiais. Whipple skydas skirtas fragmentuoti mažas šiukšles į debesėlį, kuris išsiskleidžia ir smūgiuoja didesnę korpuso, ar sekančios plokštelės, plotą. Išsiskleidusio debesėlio smūgis sukelia mažesnius įtrūkimus korpuse.

Pabrėžiami trys hiper-greičio regionai/ribos: balistinio, fragmentavimo ir lydymosi, kuriems būdingi skirtingi dalelės debesėlio reiškiniai. Skydams tyrinėti atliekami eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai: skaitiniuose tyrimuose naudojamos hidrokodinės programos, kurių modeliai imituoja tiksliai medžiagų dinaminis reiškiniai. Populiarūs skaitinių tyrimų medžiagos terpės modeliavimo metodai yra SPH ir lagranžinių elementų.

Šiuolaikiniai Whipple skydų tyrimai (skaitiniai ir eksperimentiniai) parodo, jog optimalus būdas patobulinti vienos aliuminio plokštelės skydo efektyvumą pasiekiamas per plokštelių struktūrinių ir medžiaginių savybių koregavimą. Tyrimai parodo, kad adatos, N-, „kiaušinių dėžutės“, korio užpildo formos, dvigubos medžiagos, titano, amorfinės medžiagos skydai turi geras efektyvumo charakteristikas lyginant su aliuminio plokštelės skydu. Paminėti patobulinimai pagirsti didesniu dalelės fragmentavimu, didesniu jos kinetinės energijos praradimu, palankesniu (t.y. daugiau kontroliuojamu) dalelių debesėlio formavimu/išsiskleidimu.

Taigi, tyrimai parodo, jog tolimesni skydo patobulinimai turi būti nutaikyti į pažangesnių medžiagų ir struktūrų naudojimą, ir į šių patobulinimų optimalų derinimą.

2. Skydo patobulinimų tyrimas

Siekiant atskleisti kokie struktūriniai ir medžiaginiai patobulinimai parodo perspektyvų efektyvumo prieaugį, lyginant su vienos plokštelės skydu, numatytas sekantis darbas – skaitiniu būdu sukurti ir ištirti vienos aliuminio plokštelės skydo (toliau – bazinis skydas) modelį, suteikti jam penkis struktūrinių savybių patobulinimus ir ištirti kaip jie padidina skydo efektyvumą prie standartizuotų tyrimų sąlygų. Numatyti sekantys skydų patobulinimai: tarpinės plokštelės, koreguoto storio, koreguotos struktūros, koreguotos medžiagos ir koreguoto atstumo. Taip pat siekiama sukurti aukščiausio efektyvumo skydą, kuris kombinuotų ištirtus patobulinimus ir būtų efektyvus prie visų tyrimų sąlygų.

2.1. Skaitinis modelis

Pagrindiniai skaitinių skydų tyrimų pranašumai, lyginant su eksperimentiniais, yra kompiuterinių programų prieinamumas, pakankamai tikslus fizinių reiškinių modeliavimas ir naudojimo patogumas (t.y. prieinamumas naudotojams be specializuoto apmokymo). Skaitinio tyrimo rezultatai leidžia gauti tinkamo lygio supratimą apie skydo įtrūkimus, dalelių debesėlio formavimą, debesėlio energiją ir kitus smūgio reiškinius. Tokiu supratimu pagrindžiami tolimesni skydų patobulinimai ir tyrimai. Šitam darbui atlikti pasirinktas skaitinis modelis dėl jo prieinamumo ir aktualumo.

2.1.1. Lagranžinis metodas

Lagranžiniame metode kūnų medžiaga padalinama į skaitinio tinklelio elementus, I-J-K forma (kur I – X-ašies, J – Y-ašies ir K – Z-ašies kryptis). Dvimačiame modelyje naudojama I-J formą. Vienas medžiagos elementas apribuotas keturių viršūnių. Viršūnių judėjimas simuliuoja medžiagos deformaciją ir medžiaginių savybių perdavimą. Toks metodas yra optimalus (ganėtinai) mažų deformacijų atvejais. Didelių deformacijų atvejais lagranžinių tinklelių elementams būdingas iškraipymas ir invertavimas. Iškraipymą pataisyti reikalingi papildomi kompiuteriniai ištekliai, tinkleliui atnaujinti, arba medžiagos erozijos modeliai. Lagranžiniams modeliams būdingas nedidelis kompiuterinių išteklių sunaudojimas.

2.1.2. SPH metodas

SPH metode, medžiaga padalinama į taškinius elementus (daleles), kurie atstovauja medžiagos terpei [42, 43]. SPH dalelių medžiagos masės ir judesio kiekio tvermės dėsniai apskaičiuojami pagal formules (2, 3) [43]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{dv^\alpha}{dx^\alpha} \quad (2)$$

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma^{\alpha\beta}}{dx^\beta} + f^\alpha \quad (3)$$

čia ρ – medžiagos tankis [kg/m^3];

α - Kartezinis x komponentas;

β – Kartezinis y komponentas;

t – laikas [s];

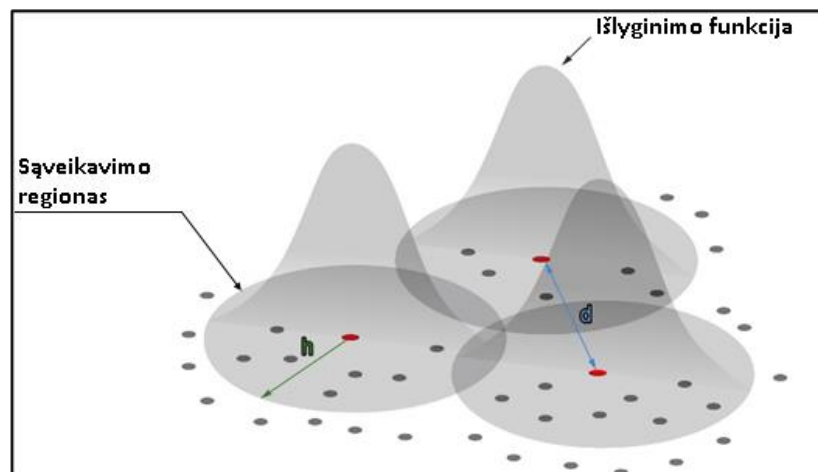
v – greitis [m/s];

$\sigma^{\alpha\beta}$ – visų įtempių tenzorius (kuriame p - įtempiai ir $\tau^{\alpha\beta}$ - deviatorinis šlyties įtempių tenzorius).

Kiekvienas elementas atvaizduoja medžiagos terpės vienetą su atitinkamomis medžiagos savybėmis (mase, temperatūra, įtempiais, t.t.) ir perduoda dinaminis reiškinius kitiems elementams savo sąveikavimo regione (žr. pav. 6). Išlyginimo funkcija apriboja sąveikavimo regioną pagal dalelės tankį.

SPH modeliavimo metodas gerai tinka atvaizduoti medžiagos atitrūkimą, dalelių debesėlį [37, 44], bet reikalauja geresnių kompiuterinių išteklių. Kaip parodo skaitiniai tyrimai, SPH puikiai tinka atvaizduoti hiper-greičio smūgius prie skirtingų tyrimų sąlygų [40, 41, 44].

Galimas ir dviejų metodų panaudojimas viename modelyje. Toks hibridinis metodas leidžia taikyti tikslesnį SPH metodą kūnams, kur reikalingas detalesnis medžiagos modeliavimas, pavyzdžiui priekiniai arba tarpinei plokštelėms, smūgiuojančiai dalelei. Tuo tarpu, greitesnis lagranžinis metodas taikomas kūnui, kurio įtrūkimai yra tikėtina mažesni - galinei plokštei. Be to, taikant SPH metodą skydo plokštelėms ir smūgiuojančiai dalelei, padidinamas dalelių debesėlio formavimo tikslumas.



6 pav. SPH elementų sąveikavimo regiono atvaizdavimas [55]

Tyrinėjant skydus skaitiniu būdu dažnai dokumentuojami: skydų įtrūkimai - perforacijos skersmuo, medžiagos atitrūkimas, dalelės energijos praradimas po smūgio, dalelių debesėlio formavimas. Tokie rezultatai leidžia pagrįsti skydo efektyvumą ir palyginti su kitų tyrimų rezultatais (skaitiniais ir eksperimentiniais).

2.1.3. Programinė įranga

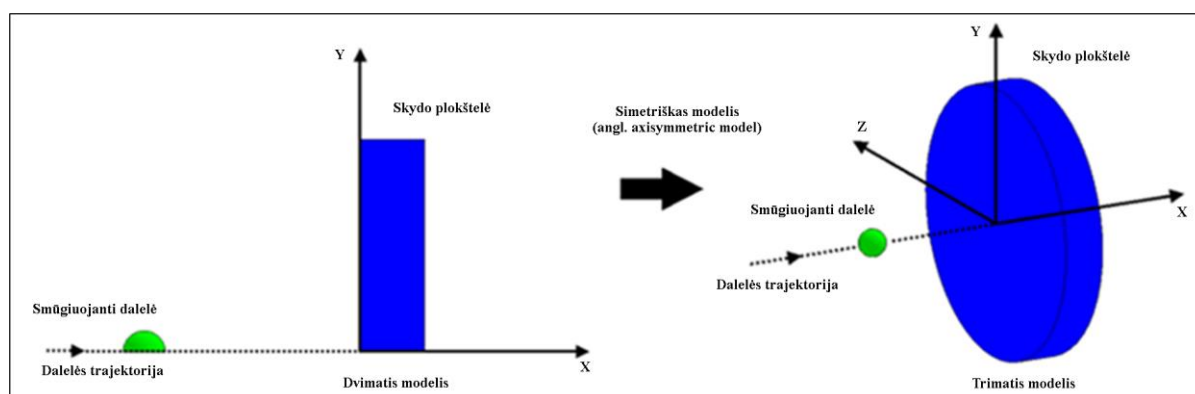
Smūgiams modeliuoti naudojamos kompiuterinės programos su hidrokodu. Hidrokodas yra klasikinės terpės mechanikos (angl. *classical continuum mechanics*) skaitinių funkcijų algoritmas, naudojamas dinaminiam medžiagos atsakams ir makro-mechanikai modeliuoti. Pagal Pierazzo ir Collins [47], toks modeliavimas diskretizuoja (aproksimuoja) diferencialines lygtis, reikalingas

medžiagų terpės fiziniams reiškiniams apskaičiuoti per kiekvieną modelio laiko įteravimą (angl. *time-step*). Tai atliekama naudojant SPH ar lagranžinius skaitinius metodus (galimi ir kiti). Hidrokodinė programa su kiekvienu modelio laiko iteravimu apskaičiuoja kiekvienos medžiagos elemento koordinatas ir savybes, remiantis tą elementą veikiančiomis vidinėmis ir išorinėmis jėgomis. Hidrokodą sudaro trys pagrindiniai faktoriai: makroskopiniame lygyje taikomi Niutono dėsniai, medžiagos (vidinio) slėgio, tankio ir energijos sąveika (vidinė energija), ir medžiagos deformacijų ir irimo sąveika [47]. Du paskutiniai aprašomi kaip medžiagos būsenos ir medžiagos plastiškumo modeliai (angl. *equation of state, material strength model*). Išvesti daugybė skirtingų medžiagos modelių, naudojančių skirtingus parametrus fiziniams reiškiniams imituoti.

Programinės įrangos Ansys moduliai AUTODYN ir LS-DYNA yra dažnai naudojami hiper-greičio smūgiams modeliuoti. Šie moduliai turi hidrokodą, yra prieinami, turi didelę integruotą medžiagų biblioteką, taip pat leidžia naudoti hibridinius skaitinius metodus viename modelyje. Šios programos yra aktualios ne tik hiper-greičio smūgiams tyrinėti bet ir kitiems netiesinės dinamikos reiškiniams studijuoti [51]. Darbui atlikti buvo pasirinkta Ansys AUTODYN programą dėl jos patogumo, prieinamumo¹ ir aktualumo Whipple skydų tyrimuose.

2.1.4. Modeliavimo erdvė

AUTODYN programoje naudojamas dvimatis (2D) simetriškumo pagal ašį modelis (angl. *axisymmetric model*). Modeliavimo erdvėje, kūnai yra simetriški apie pasirinktą ašį, šiuo atveju – X ašį (taip pat dalelės trajektorijos ašis). Modeliuojami pusapskritimo formos smūgiuojančios dalelės ir stačiakampio formos plokštelės, atitinkamai paverčiami į sferą ir cilindro formos plokštelę trimatėje erdvėje (žr. pav. 7). Toks modelio supaprastinimas yra optimalus būdas sumažinti modeliavimo laiką, nepaveikiant rezultatų tikslumo.



7 pav. AUTODYN-2D simetriškumo modelis (*axisymmetric model*)

2.2. Medžiagų pasirinkimas

Darbe naudojama integruotą į AUTODYN medžiagų biblioteką. Tyrime panaudotos medžiagos pateiktos 1 lentelėje. Ne visos programos bibliotekoje pateiktos medžiagų savybės tinka tiksliam hiper-greičių smūgių modeliavimui. Reikalingos medžiagų savybės buvo gautos iš aktualios literatūros ir įrašytos vietoj bibliotekinių. Tiksliam medžiagų fizinių reiškinų imitavimui smūgio metu, naudojami medžiagos modeliai. Šitie modeliai aprašo medžiagų agregatinę būseną, vidinį

¹ Akademinis Ansys programos paketas pateikiamas Kauno Technologijos Universiteto IT paslaugų programinės įrangos svetainėje. Akademinis paketas turi apribotą elementų skaičių, ~128 000 vienam kūnui.

plastinį atsaką, poslinkių ir deformacijų reiškinius, irimo procesus ir kitas mechanines savybes. Darbe naudojamas Al 6061-T6 lydinis dalelėms ir Al 7075-T6 lydinis priekiniai, tarpiniai ir galinei plokštelėms. Kai kuriuose tyrimuose skydams taip naudojamas titano Ti-6Al-4V lydinis.

1 lentelė. Darbe naudojami medžiagos modeliai ir jų parametrai

Medžiagos modelis:	Parametras:	Vienetai:	Al 6061-T6	Al 7075-T6	Ti-6Al-4V
Medžiagos būsenos modelis (EOS): Shock (Mie-Grüneisen-Hugoniot)	Referencinis tankis ρ	kg/m ³	2703	2804	4420
	Grüneisen koeficientas	-	1.97	2.20	1.23
	Parametras $C1$	m/s	5240	5200	5130
	Parametras $S1$	-	1.40	1.36	1.028
	Kvadratinis parametras $S2$	s/m	0	0	0
	Santykinis tūris $VE/V0$	-	0	0	0
	Santykinis tūris $VB/V0$	-	0	0	0
	Parametras $C2$	m/s	0	0	0
	Parametras $S2$	-	0	0	0
	Referencinė temperatūra T_0	K	293	293	293
Savitoji šiluminė talpa C_p	J/kgK	885	848	525	
Medžiagos plastiškumo modelis (Strength model): Johnson-Cook	Šlyties koeficientas (Shear modulus) G	MPa (GPa)	26000 (26)	26700 (26.7)	44000 (44)
	Pradinė tamprumo riba A	MPa	324	520	1098
	Sustiprėjimo pastovioji B	MPa	114	400	1092
	Sustiprėjimo eksponentė n	-	0.42	0.43	0.93
	Deformacijos greičio pastovioji C	-	0.002	0.015	0.014
	Terminio suminkštėjimo eksponentė m	-	1.34	1.50	1.1
	Lydymosi temperatūra T_{melt}	K	925	750	1903
	Plastinės deformacijos greitis $\dot{\epsilon}^*$	-	1.0	1.0	1.0
Medžiagos irimo modelis (Failure model): Grady spall model	Referencinis tankis ρ	kg/m ³	2703	2804	4420
	Medžiagos terpės garso greitis c	m/s	5240	5200	5130
	Tamprumo riba γ	MPa	324	520	1098
	Kritinė deformacija ϵ_C	-	0.15	0.15	0.15
Erozijos modelis (Erosion model): Geometrinė deformacija (Geometric strain)	Erozijos deformacija (erosion strain)	-	2.0 (200%)	2.0 (200%)	2.0 (200%)
	Metodas	-	Momentinis	Momentinis	Momentinis
Šaltiniai²			[48]	[49, 52]	[56]

² Nurodyti šaltiniai buvo panaudoti kai kurioms bibliotekos medžiagų savybėms pakeisti.

2.2.1. Medžiagos būsenos modelis Shock (Mie-Grüneisen-Hugoniot)

Naudojamas darbe medžiagos būsenos (termodinaminis) modelis (toliau – EOS, angl. *equation of state*) yra Shock. EOS aprašo medžiagos agregatinę būseną (t.y. vidinę energiją) prie tam tikrų fizinių sąlygų. Shock EOS yra Mie-Grüneisen slėgio formuluoatę pagal Hugoniot šokinio greičio priklausomybę [45, 51]. Vidinis medžiagos slėgis apskaičiuojamas pagal (4) formulę:

$$P = P_H + \Gamma_0 \rho_0 (e - e_H); \quad (4)$$

čia P – vidinis medžiagos slėgis [Pa];

P_H – specifinis vidinis slėgis pagal Hugoniot priklausomybę [Pa];

Γ_0 - Grüneisen parametras (pastovioji, lygus Γ_r);

ρ_0 – referencinis (pradinis) tankis [kg/m^3] (pastovioji);

e - vidinė energija [J];

e_H – specifinė vidinė energija pagal Hugoniot priklausomybę [J].

Grüneisen parametras apskaičiuojamas pagal (5) formulę:

$$\Gamma_0 = \Gamma_r = (\partial P / \partial e)_\rho; \quad (5)$$

Specifinis vidinis slėgis P_H apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2}; \quad (6)$$

čia c_0 – referencinis (pradinis) medžiagos terpės garso greitis [m/s];

μ – kompresija ($\rho/\rho_0 - 1$);

s – šokinio/dalelių greičio gradiento pastovioji.

Specifinė vidinė energija e_H apskaičiuojama pagal (7) formulę:

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right). \quad (7)$$

Toks EOS pasirinkimas pagristas gera rezultatų koreliacija su eksperimentiniais tyrimais, parametru prieinamumu literatūroje, geru šio EOS derinimu su Johnson-Cook plastiškumo modeliu³ [44, 45, 50]. Shock modelis neaprašo medžiagų agregatinės būsenos virsmo dėl terminių sąlygų. Būsenos virsmas būdingas smūgiams prie lydymosi greičio (>8 km/s). Darbe daugiau dėmesio skiriama mažo ir vidutinio greičio režimams, todėl Shock EOS laikomas optimaliu pasirinkimu.

³ Johnson-Cook plastiškumo modelis implementuoja medžiagos suminkštėjimo dėl terminio poveikio parametru, t.y. šlyties stiprumo paradimą dėl medžiagos lydymosi.

2.2.2. Medžiagos plastiškumo modelis Johnson-Cook

Johnson-Cook (toliau – JC) plastiškumo modelis aprašo medžiagos mechaninių savybių (tamprumo ribos) pokytį prie didelių deformacijų, deformacijų greičių ir terminių sąlygų [51]. Medžiagos efektyvioji tamprumo riba apskaičiuojama pagal (8) formulę:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T_H^{*m}) \quad (8)$$

čia σ – efektyvioji tamprumo riba [Pa];

A – pradinės tamprumo ribos pastovioji [Pa];

B – sustiprėjimo pastovioji [Pa];

ε – efektyvioji plastinė deformacija;

n – sustiprėjimo eksponentė;

C – deformacijos greičio pastovioji;

$\dot{\varepsilon}^*$ - normalizuotas plastinės deformacijos greitis;

T_H – homologinė temperatūra [K];

m – terminio suminkštėjimo eksponentė.

Pirmi skliaustai išreiškia įtempius kaip funkciją prie $\dot{\varepsilon}^* = 0$, ir $T_H = 0$ (t.y. prie laboratorinių sąlygų, kai medžiaga yra dar nepaveikta). A išreiškia tamprumo ribą prie mažų deformacijų, B ir n išreiškia deformacijos sukeltą medžiagos sustiprėjimą. Antri skliaustai išreiškia deformacijos greičio įtaką tamprumo ribai, treči skliaustai išreiškia terminę įtaką. Imituojant medžiagos lydymąsi, pasiekiant lydymosi temperatūros, medžiagos tamprumo ribą paverčiama nuliu. Tokio plastiškumo modelio naudojimas kartu su Shock EOS koreguoja trūkstantį Shock EOS medžiagų atsaką į termines sąlygas.

Modelio pasirinkimas pagristas parametų prieinamumu literatūroje, gera koreliacija su eksperimentiniais tyrimais ir optimizavimu hidrokode, t.y. naudotojas gali taikyti papildomus korekcinius faktorius (faktoriai koreguoja makro-lygio svyravimą, būdingą tamprumo ribą pasiekusioms medžiagoms, patiriančioms aukštą deformacijos greitį. Programa automatiškai taiko pirmos-eilės korekciją [51]).

2.2.3. Medžiagos irimo modelis Grady spall

Irimo modelis aprašo medžiagos dinaminis irimo reiškinius – medžiagos savybių keitimą kai pasiekama stiprumo ribą (t.y. medžiagos stiprumo apribojimas). Darbe naudojamas Grady irimo (angl. *Grady spall*) modelis aprašomas pagal (9) formulę:

$$S = \sqrt{2\rho c^2 \gamma \varepsilon_c} \quad (9)$$

čia S – kritinio irimo riba (angl. *critical spall stress*) [Pa];

ρ – medžiagos tankis [kg/m³];

c – garso greitis terpėje [m/s];

γ – tamprumo riba [Pa];

ε_C – kritinė deformacija.

Programoje šis modelis apskaičiuoja kiekvieno elemento kritinio irimo ribą automatiškai - Grady modelis naudoja būsenos ir plastiškumo modelių parametrus. AUTODYN kiekvieną laiko iteravimą automatiškai apskaičiuoja vietinę kritinę irimo ribą ir lyginą ją su maksimaliu vietiniu tempimo įtampiu (angl. *maximum principal tensile stress*). Pagal Grady [58], standartinė plastiškos medžiagos (metalo) kritinės deformacijos vertė ε_C yra 0.15. Apskaičiuojant rankiniu būdu pagal formulę (9), aliuminio Al 6061-T6 kritinio irimo riba yra 2.6 GPa, aliuminio Al 7075-T6 – 3.4 GPa, titano Ti-6Al-4V – 6.1 GPa.

2.2.4. Medžiagos erozijos modelis geometrinė deformacija

Erozija yra skaitinis būdas automatiškai pašalinti elementus modelyje. Tai daroma tam, kad išvengtų per didelio elementų iškraipymo. Tokių elementų šalinimas užtikrina stabilų modelio laiko iteravimą. Be to, erozija naudojama simuliuoti medžiagų įtrūkimus, lūžimą ir perforaciją. Darbe naudojama erozija pagal geometrinę deformaciją. Tokia deformacija apibrėžiama pagal elemento geometrinį iškraipymą (angl. *distortion*), pagal (10) formulę [51]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{3} [|(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2) - (\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx}) + 3(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)|]^{1/2} \quad (10)$$

čia ε_{eff} – elemento geometrinė deformacija;

ε_{xx} – deformacijos tenzorius X-X plokštumoje;

ε_{yy} – deformacijos tenzorius Y-Y plokštumoje;

ε_{zz} – deformacijos tenzorius Z-Z plokštumoje;

ε_{xy} – deformacijos tenzorius X-Y plokštumoje;

ε_{yz} – deformacijos tenzorius Y-Z plokštumoje;

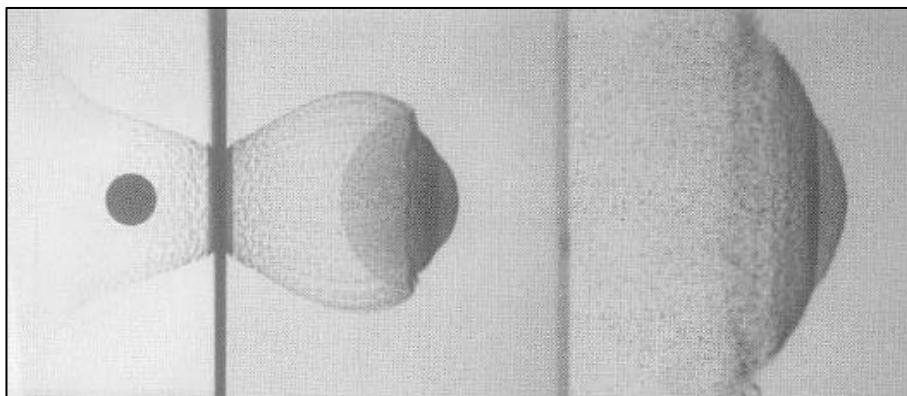
ε_{zx} – deformacijos tenzorius Z-X plokštumoje.

Naudotojas pasirenka erozijos reikšmę. Daugeliui modelių tinka reikšmės tarp 0.5 ir 3.0. Skaičiuojama procentais (t.y. 1.0 tai 100% geometrinės deformacijos). Darbui pasirinkta geometrinės deformacijos vertė 2.0 (200%) – tokia vertė parodo pakankamai aukštą sutapimą su eksperimentinių tyrimų rezultatais prie darbe naudojamų greičių⁴ [51].

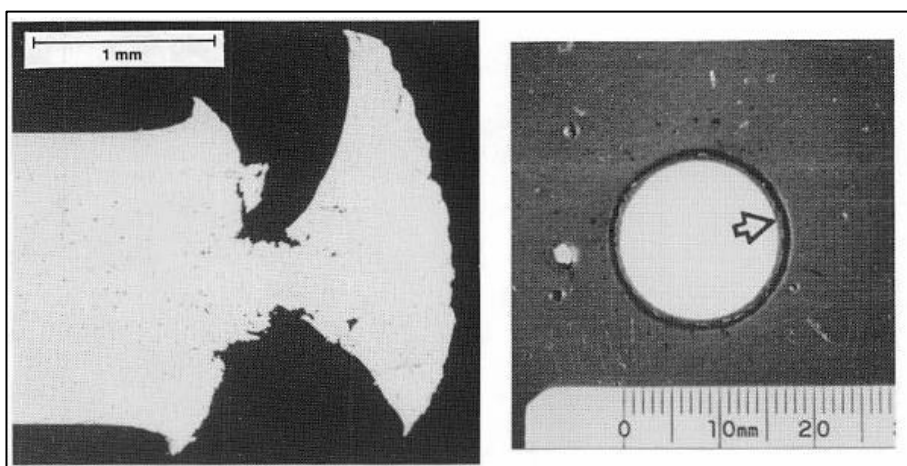
⁴ Kaip parodė skaitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, smūgiuose iki ~8 km/s 2.0 (200%) geometrinė erozija parodo aukščiausią rezultatų sutapimą. Nuo ~11 km/s 3.0 (300%) geometrinė erozija yra tikslesnė.

2.2.5. Verifikacijos modelis

Nustatyti naudojamųjų medžiagos modelių ir skaitinių metodų atitinkamumą realiems hiper-greičio smūgiams, imituojamas eksperimentinis tyrimas. Šio tyrimo tiksliai užfiksuoti rezultatai lyginami su verifikacijos modelio, siekiant nustatyti galimos paklaidos reikšmę. Verifikacijai pasirinktas Piekutowski atliktas tyrimas 4-1291, kur buvo smūgiuojama į 1.549 mm storio Al 6061-T6 plokštelę, 9.53 mm skersmens Al 2017-T4 rutuliuku prie 6.71 km/s greičio [53]. Tyrimo metu padarytos radiografinės nuotraukos ir užfiksuoti plokštelės įtrūkimai (žr. pav. 8, 9 ir 10).

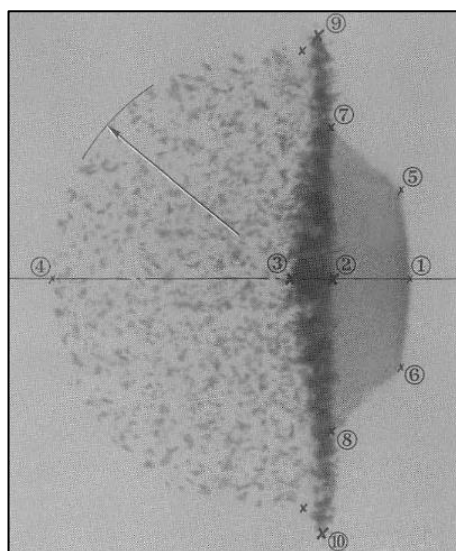


8 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas. Dalelių debesėlio radiografinės nuotraukos 7.2 ir 20.3 μ s po smūgio [53]



9 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas. Pirmą nuotrauką: plokštelės įtrūkimo vietos skerspjūvis. Antra nuotrauka: plokštelės perforacija⁵ [53]

⁵ Pirmoje nuotraukoje priekinis plokštelės paviršius yra viršutinėje nuotraukos dalyje, antroje nuotraukoje parodytas priekinis plokštelės paviršius.



10 pav. Eksperimentinis smūgio tyrimas: dalelių debesėlio matavimo taškai⁶ [53]

Dalelių debesėlio matmenis (žr. 10 pav.) užfiksuoti 20.3 μ s po smūgio. Palyginimui naudojami taškai 1, 2, 3, 4 ir 7. Verifikacijos modelis atliktas prie identiškų sąlygų. Aliuminio lydiniui Al 2024-T4 taikomi identiškai Al 6061-T6 medžiagos modeliai: Shock EOS, JC plastiškumo ir Grady irimo⁷.

2.2.6. Verifikacijos modelio rezultatai

Užfiksuoti Piekutowski [53] eksperimento rezultatai lyginami su skaitinio verifikacijos modelio 2 lentelėje. Skaitiniame modelyje įtrūkimas matuojamas pagal atstumą nuo simetrijos ašies (X-ašies, žr. 1 priedą).

2 lentelė. Verifikacijos modelio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas⁸

Tyrimas:	Plokštelės perforacijos skersmuo:	Dalelių debesėlio matmenys (matavimo taškas – matmuo):
Eksperimentinis tyrimas	16.5608 mm	1 – 127.508 mm 2 – 122.174 mm 3 – 120.142 mm 4 – 75.692 mm 7 – 121.158 mm
Skaitinis tyrimas	17.2 mm	1 – 126.5 mm 2 – 121.7 mm 3 – 118.4 mm 4 – 76.0 mm 7 – 120.5 mm
	Skirtumas / santykinis skirtumas:	Skirtumas/ santykinis skirtumas:

⁶ Matuojama nuo plokštelės priekinio paviršiaus. Paveikslėlyje parodytas ne tyrimo 4-1291 debesėlis.

⁷ Dėl sudėtingumo rasti Al 2024-T4 medžiagos modelių parametrus literatūroje, verifikacijos modeliui naudojami panašaus Al 2024-T4 lydinio parametrai. Parametrai gauti iš medžiagų bibliotekos ir literatūros.

⁸ Eksperimentinio tyrimo rezultatai užfiksuoti coliais, darbai verčiami į milimetrus.

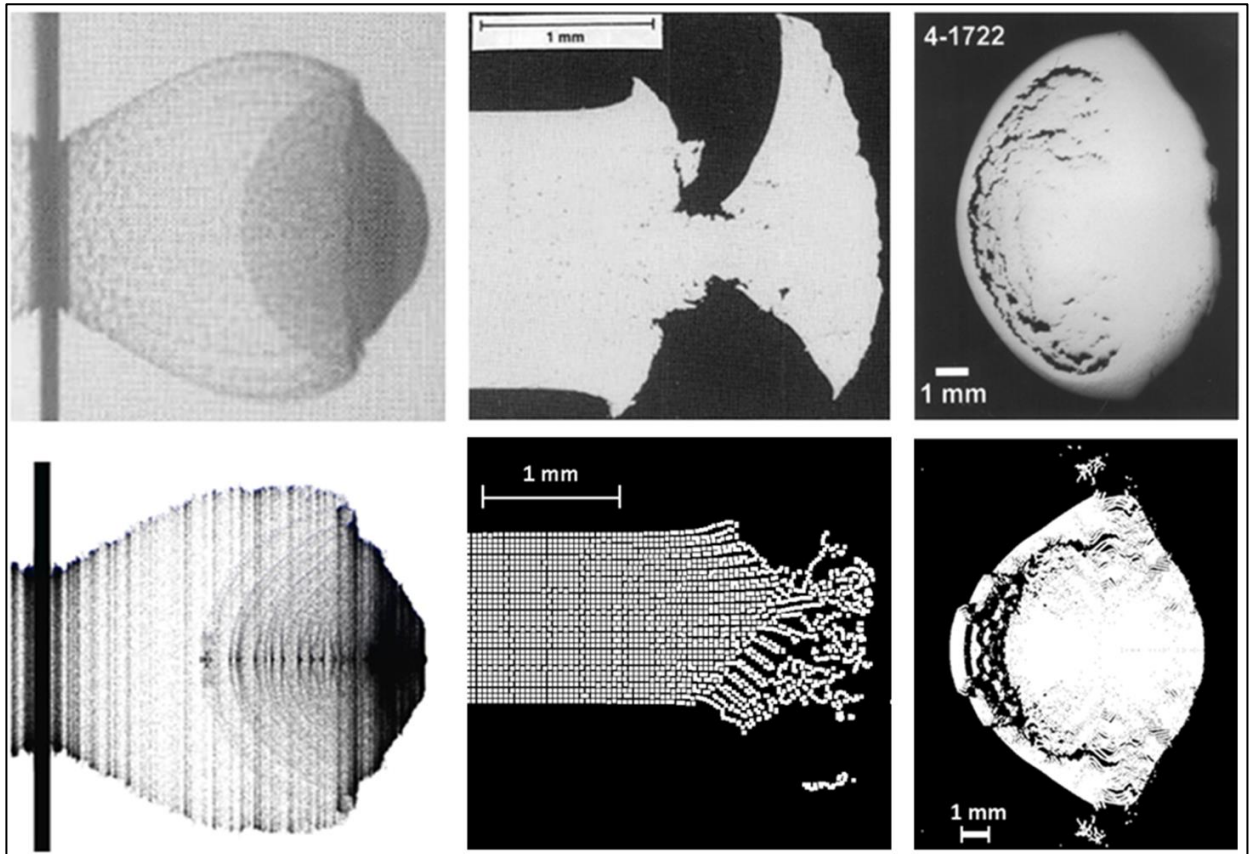
Skirtumas tarp skaitinių ir eksperimentinių rezultatų	0.692 mm / 4.19 %	1 – 1.008 mm / 0.8 %
		2 – 0.474 mm / 0.4 %
		3 – 1.742 mm / 1.5 %
		4 – 0.308 mm / 0.4 %
		7 – 0.658 mm / 0.5 %

Skaitinio modelio įtrūkimo skersmuo yra 17.2 mm, lyginant su eksperimento 16.508 mm, tai yra 4.19 % skirtumas. Skaitinio modelio dalelių debesėlis ir jo formavimas parodė gerą sutapimą su radiografinė nuotrauka: aiškiai matomi debesėlio regionai su skirtingomis fragmentų koncentracijomis. Užfiksuoti 20.3 μ s debesėlio matmenis parodo labai aukštą rezultatų koreliaciją: didžiausias skirtumas yra 1.742 mm, arba 1.5 %. Skaitinio modelio plokštelės skerspjūvis parodo mažesnę tikslumą: eksperimentiniame tyrime prie įtrūkimo vietos susidarė ryškus medžiagos „apendiksas“, tuo tarpu, skaitiniame modelyje „apendiksas“ turi daugiau suapvalintą formą. Galima nevisiško sutapimo priežastis – netinkamo⁹ SPH elementų skaičiaus ir/arba geometrinė erozijos paklaidos. Debesėlio matmenų užfiksavimas parodytas 3 priede.

Taip pat buvo atlikta papildoma verifikacija, kur lyginama skaitinės dalelės deformacija su eksperimentinio tyrimo ekvivalentu. Dalelės verifikacijos modelis imituoja Piekutowski tyrimą 4–1722, kur buvo smūgiuojama į 1.257 mm storio Al 6061-T6 plokštelę, 9.53 mm skersmens Al 2017-T4 rutuliuku prie 2.54 km/s greičio [57]. Skaitinis modelis parodė vidutinę koreliaciją su eksperimentiniais rezultatais: dalelė patyrė panašius irimo ir deformacijos reiškinius galinėje dalyje (žr. 11 pav.), bet užfiksuotas didesnis medžiagos atitrūkimas nei eksperimentiniame tyrime. Pabrėžiama, kad eksperimentiniame tyrime dalelė buvo sustabdyta smūgiu į minkštą medžiagą (putų polistireną [57]), kas galėjo įtakuoti galutinę dalelės formą (tuo tarpu skaitiniame modelyje dalelės įtrūkimai matuojama „skrydyje“, t.y. dalelė nesustabdoma).

11 paveikslėlyje viršutinėje eilutėje parodyti eksperimentinio tyrimo rezultatai: dalelių debesėlis, skydo įtrūkimo skerspjūvis, dalelės deformacija. Apatinėje eilutėje pateikti identiški skaitinio verifikacijos modelio rezultatai.

⁹ Galimos paklaidos dėl sąveikavimo regionų nesutapimo, jei vienas iš modeliujamųjų kūnų turi kelis kartus daugiau elementų nei kitas (žr. 2 priedą).



11 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų nuotraukos ir vaizdai¹⁰

Toks rezultatu sutapimas parodo darbe naudojamos metodologijos tinkamumą ir medžiagų savybių tikslumą. Darbo rezultatai laikomi pakankamai tiksliais, kad daryti pagrįstas išvadas apie tiriamų skydų efektyvumą¹¹.

2.3. Skaitinių modelių sąlygos

Toliau darbe vartojamas terminas „(skydo) tyrimas“, žymint vienos ar kitos skydo struktūros tyrimą prie tam tikrų sąlygų. Visuose (bazinio efektyvumo ir patobulintų skydų) tyrimuose, taikomos sekančios modeliavimo sąlygos:

1. Mažiausiai 30 SPH elementų pro smūgiuojančios dalelės skersmenį¹²;
2. Mažiausiai 15 SPH elementų pro skydo plokštelės storį (kiekvienos plokštelės, jei naudojamos dvi);
3. 20 lagranžinių elementų pro galinės plokštelės storį;
4. 80 μ s laiko apribojimas¹³;

¹⁰ Skaitinio modelio radiografinės fotografijos imitavimui naudojamas „grey scale“ linearizavimas. Linearizuojama pagal medžiagos tankį. Dalelių debesėlio nuotrauka ir vaizdas padaryti 7.2 μ s po smūgio. Dalelės nuotrauka padaryta po tyrimo, vaizdas – 15 μ s po smūgio.

¹¹ Gautų rezultatų aukščiausio tikslumo verifikacijai reikalingi ekvivalentiniai, šio darbo skaitiniams, eksperimentiniai tyrimai.

¹² Siekiant sumažinti paklaidas dėl skirtingų SPH elementų sąveikavimo regionų (tarp kūnų) ir sumažinti kompiuterinių išteklių sunaudojimą, 3 mm skersmens dalelei taikomas 0.1 mm elemento dydis, 6 mm dalelei – 0.16 mm, 9 mm dalelei – 0.18 mm.

¹³ Rezultatai užfiksuojami anksčiau laiko apribojimo, jei dalelių debesėlio fragmentai sulėtėja iki mažesnio nei hipergreitis greičio (< 0.8 km/s).

5. Įjungta funkcija, išsaugojanti dėl erozijos pašalintų elementų inerciją (greitį, masę¹⁴);
6. Jei nenurodyta kitaip, atstumas tarp priekinės ir galinės plokštelių – 70 mm (matuojamas pagal atstumą tarp plokštelių priekinių paviršių);
7. Oro pasipriešinimo ir trinties faktoriai netaikomi, imituojamos laboratorinės sąlygos¹⁵;
8. Laisvojo kritimo pagreitis netaikomas;
9. Plokštelės įtvirtintos naudojant nulinio greičio kraštinės sąlygą (angl. *boundary condition*, sąlyga taikoma 3-5 mm nuo plokštelės krašto);
10. SPH elementų apribojimas (angl. *cut-off*) pagal laiko iteravimą: elementų tankis apribojamas, jei jų iteravimo laikas¹⁶ tampa mažesnis nei 1×10^{-8} s (apribojimo vertė nustatoma automatiškai);
11. SPH elementų išlyginimo funkcija pagal dalelių dydį;
12. Modeliai atliekami per vieną bandymą, t.y. nepristabdomi atlikimo metu.

Bazinio efektyvumo lygiui nustatyti, atlikti vienos plokštelės tyrimai: į 1 mm storio Al 7075-T6 skydą (SPH) smūgiuojama 1, 2, 3, 6 ir 9 mm skersmens Al 6061-T6 dalelėmis (SPH) prie 3.5, 7.0 ir 9.0 km/s. 70 mm atstumu nuo priekinės plokštelės uždėta 4 mm storio Al7075-T6 galinė plokštelė, imituojanti erdvėlaivio korpusą (lagranžinis). Po smūgio užfiksuojami šio skydo efektyvumo kriterijai.

2.3.1. Skydo efektyvumo kriterijai

Tyrimų metu užfiksuojami skydų įtrūkimai/efektyvumo kriterijai nurodyti 3 lentelėje. Įtrūkimai vienodai matuojami priekiniai, tarpiniai ir galinei plokštelėms. Įtrūkimų matavimo metodas identiškas verifikacijos modelio (žr. 1 priedą). Galutinis skydo efektyvumas nustatomas pagal galinės plokštelės (korpuso) įtrūkimus. Galinė plokštelė laikoma žlugusi/suirusi, jei kritinio įtrūkimo skersmuo yra didesnis nei 30 mm.

3 lentelė. Efektyvumo kriterijų paaiškinimas

Efektyvumo kriterijus:	Paaškinimas:
Plokštelė nepaveikta	Smūgiuojančios dalelės/ dalelių debesėlio smūgis į plokštelę nesukėlė matomų įtrūkimų, arba dalelių debesėlis nepasiekė plokštelės. Nekritinis įtrūkimas.
Minimalūs įtrūkimai	Smūgiuojančios dalelės/ dalelių debesėlio smūgis į plokštelę sukėlė minimalius įtrūkimus, t.y. įbrėžimus, mažus kraterius ir pan. Įtrūkimų gylis iki ~0.2 mm. Nekritinis įtrūkimas.
Dalinė perforacija	Smūgiuojanti dalelė/ dalelių debesėlis perforavo plokštelę, po smūgio plokštelėje liko krateris. Perforacijos gylis iki ~90% plokštelės storio. Laikoma kritinių įtrūkimų, jei kraterio gylis yra ~70% plokštelės storio.
Pilna perforacija	Smūgiuojanti dalelė/ dalelių debesėlis pilnai perforavo/prasiskverbė pro plokštelę, po smūgio plokštelėje liko skylė, kurios gylis ~90 – 100 % plokštelės storio. Kritinis įtrūkimas.
Spaliacija	Medžiagos sluoksnių atitrūkimas nuo galinio plokštelės paviršiaus. Kritinis įtrūkimas.

¹⁴ Funkcija naudojama fizinių reiškinių tikslumui padidinti, bet padaro kūnų masės praradimo nagrinėjimą neįmanomu.

¹⁵ Imituojamas absoliutus vakuumas, galimi plokštelių virpesiai dėl smūgių nenagrinėjami. Darbe nenagrinėjamas galimas kosminės radiacijos poveikis skydo medžiagoms.

¹⁶ Toks apribojimas naudojamas siekiant palaikyti stabilų laiko iteravimą modelyje.

Įvedamos sekančios vertės:

- d_h – įtrūkimo gylis [mm], taikomas tik galinei plokštei (jei pilna perforacija – 4 mm);
- d_d – įtrūkimo skersmuo [mm], taikomas visoms plokštelėms.

Vertės neužfiksuojamos, jei plokštelė nepaveikta arba patyrė minimalius įtrūkimus. Pakoreguotos medžiagos skydai naudojami vertės d_{d1} ir d_{d2} – jos pažymi priekinės ir galinės sekcijų įtrūkimų skersmenis atitinkamai.

Tyrimai žymimi kodais, kurie sudaromi pagal:

- Dalelės skersmuo – dalelės greitis (išreikštas dviem skaičiais) : numeris

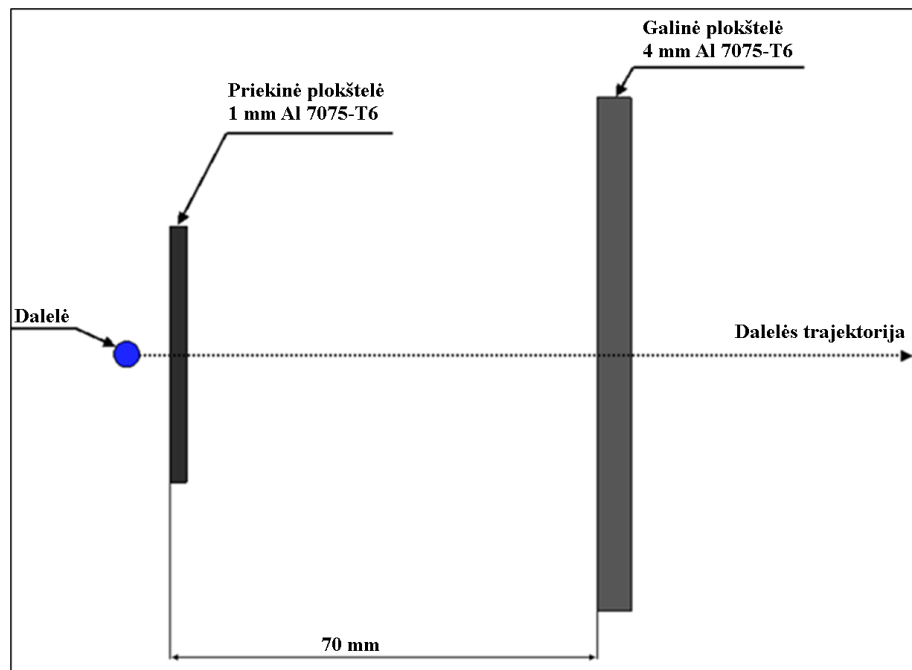
Tokiu būdu kodas 3 – 35 : 01 žymi 3 mm skersmens dalelės smūgio prie 3.5 km/s tyrimą, pirmą numerį. Numeriai naudojami patogesniai tyrimų katogrizavimui (pagal taikomus patobulinimus ir tyrimų sąlygas). Numeris 01 žymi bazinio efektyvumo tyrimą.

2.4. Bazinio efektyvumo tyrimai

Atlikti 15 bazinio efektyvumo tyrimų, prie skirtingų sąlygų. Tolimesniems tyrimams su patobulintais skydais pasirinktos tyrimų 3-35, 6-70 ir 9-90 sąlygos: į 1 mm storio plokštelę smūgiuojama 3, 6 ir 9 mm skersmens dalelėmis prie 3.5, 7.0 ir 9.0 km/s greičių atitinkamai. Patobulintų skydų tyrimai bus atlikti prie identiškų sąlygų. Tyrimams priskiriamas numeris 01, rezultatai pateikti 4 lentelėje (visų bazinio efektyvumo tyrimų rezultatai ir trijų pasirinktų tyrimų vaizdai pateikti 5 ir 6 prieduose). Bazinio efektyvumo skydo schema parodyta 12 paveikslėlyje.

4 lentelė. Bazinio efektyvumo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Priekinės plokštelės įtrūkimas d_d :	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:01	Pilna perforacija 5.2 mm	Dalinė perforacija 3.8 mm – 1.2 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.
6-70:01	Pilna perforacija 10.7 mm	Pilna perforacija 1.4 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių prie plokštelės centro. Plokštelės centras pasislinko ~1.5 mm trajektorijos link. Kritinis įtrūkimas. Pilna perforacija dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo.
9-90:01	Pilna perforacija 14.6 mm	Pilna perforacija 24.8 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių visame plokštelės paviršiuje. Plokštelė patyrė didelę spaliaciją. Kritinis įtrūkimas.



12 pav. Bazinio efektyvumo skydo schema

13 paveikslėlyje pirmoje eilutėje parodyti bendri dalelių debesėlio vaizdai, antroje parodyta elementų temperatūrą smūgio metu (raudonų elementų temperatūra yra lygi ar daugiau nei 1000 K, tamsiai mėlynų – 0 K), trečioje parodyti galinės plokštelės įtrūkimai po debesėlio smūgio (žalia spalva parodyta elastiškai deformuota medžiaga¹⁷, žydra – plastiškai, violetine – atitrūkusi/suirusi X-X plokštumoje, kitos būsenos yra nereikšmingos). Pabrėžiama, kad lydymosi greičio tyrime, lydantių elementų skaičius didesnis nei kituose¹⁸ – tai parodo taikomų medžiagos modelių tikslumą (sutartyje su BLE regionais, žr. 5 pav.).

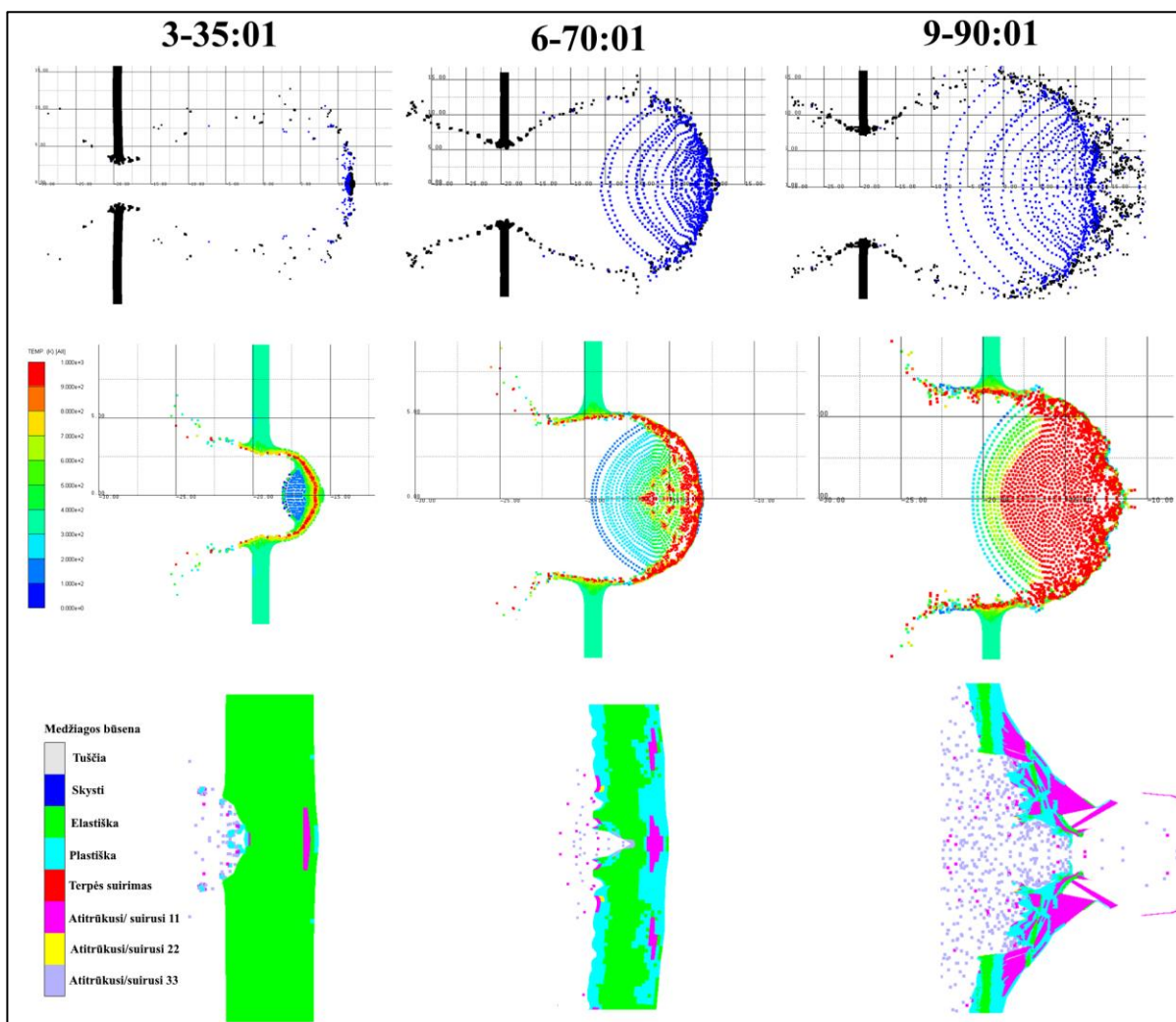
Tyrimų rezultatai parodo, jog padidinus dalelės skersmenį ir greitį, didėja priekinės ir galinės plokštelės įtrūkimai. Balistinio greičio tyrime 3-35:01, dalelė fragmentuojasi nepilnai, todėl galinę plokštelę smūgiuoja maždaug vienos, koncentruotos formos dalelių debesėlis. Tokio smūgio rezultatas yra vienas krateris plokštelės centre, 3.8 mm skersmens ir 1.2 mm gylio. Nuo plokštelės galinio paviršiaus atitrūko medžiagos sluoksnis – toliau vartojamas terminas spaliacija (nuo angl. *spallation*) žymint tokį sluoksnių atitrūkimo fenomeną (žr. 13 pav.). Spaliacijos matmenis ne užfiksuojami, bet nustatomi vizualiai ir per medžiagos būsenos kontūrus. Plokštelės įtrūkimas laikomas kritiniu dėl spaliacijos (dalinės perforacijos įtrūkimas nekritinis).

Fragmentavimo greičio tyrime 6-70:01, dalelė fragmentuojasi ir sudaro dalelių debesėlį kartu su atitrūkusią nuo skydo medžiaga. Debesėlio fragmentai koncentruoti priekiniame debesėlio regione. Lyginant su balistinio greičio tyrimu, susiformavęs galinėje plokštelėje įtrūkimas yra mažesnio skersmens (1.4 prieš 3.0 mm), bet gilesnis (pilna perforacija prieš 1.2 mm). Nors galinė plokštelė nebuvo pilnai pramušta, ji patyrė kritinį vientisumo praradimą dėl spaliacijos. Taip pat pabrėžiami keletas mažesnių kraterių prie plokštelės centro, sukelti išsiskleidusio dalelių debesėlio fragmentais. Plokštelės įtrūkimas laikomas kritiniu.

¹⁷ Nepaveiktai medžiagai suteikiama elastiška būseną.

¹⁸ Al 6061-T6 ir Al 7075-T6 lydymosi temperatūros yra 925 ir 750 K atitinkamai

Lydomosi greičio tyrime 9-90:01, galinė plokštelė patyrė didžiausią žalą: dalelių debesėlis pilnai perforavo plokštelę, jos paviršiuje susiformavo daug kraterių. Plokštelė patyrė didelę spaliaciją. Tokie įtrūkimai laikomi kritiniais (žr. 6 priedą). Dalelė suiro į debesėlį, bet jo fragmentai yra daugiau išsiskleidė iš debesėlio vidaus (t.y. debesėlio regionai mažiau struktūruoti).



13 pav. Bazinio efektyvumo tyrimų bendri, temperatūros ir galinės plokštelės medžiagos būsenos vaizdai

Patobulintų skydų tyrimams taikomos 3-35, 6-70 ir 9-90 sąlygos - tyrimai prie tokių sąlygų leis objektyviai nustatyti kokie patobulinimai efektyviausiai sumažina žalą galinei plokštei (didina efektyvumą).

2.5. Skydų patobulinimas

Siekiant padidinti bazinio skydo efektyvumą prie minėtų sąlygų, tiriama penki patobulinimo būdai: tarpinės plokštelės, pakoreguoto storio, struktūros, medžiagos ir atstumo. Tokie patobulinimai pagrįsti didesniu dalelės kinetinės energijos absorbavimu ir didesniu debesėlio išsiskleidimu.

2.5.1. Tarpinės plokštelės tyrimai

Veiksmingas būdas patobulinti skydų efektyvumą yra antros plokštelės implementavimas. Tarpinė plokštelė uždedama tarp priekinės ir galinės plokštelių - ji sugeria dalelių debesėlio energiją, taip,

potencialiai, sustabdant debesėlį prieš jam pasiekus galinę plokštelę. Antros plokštelės panaudojimas padidina skydo masę ir atraminių struktūrų standumą¹⁹.

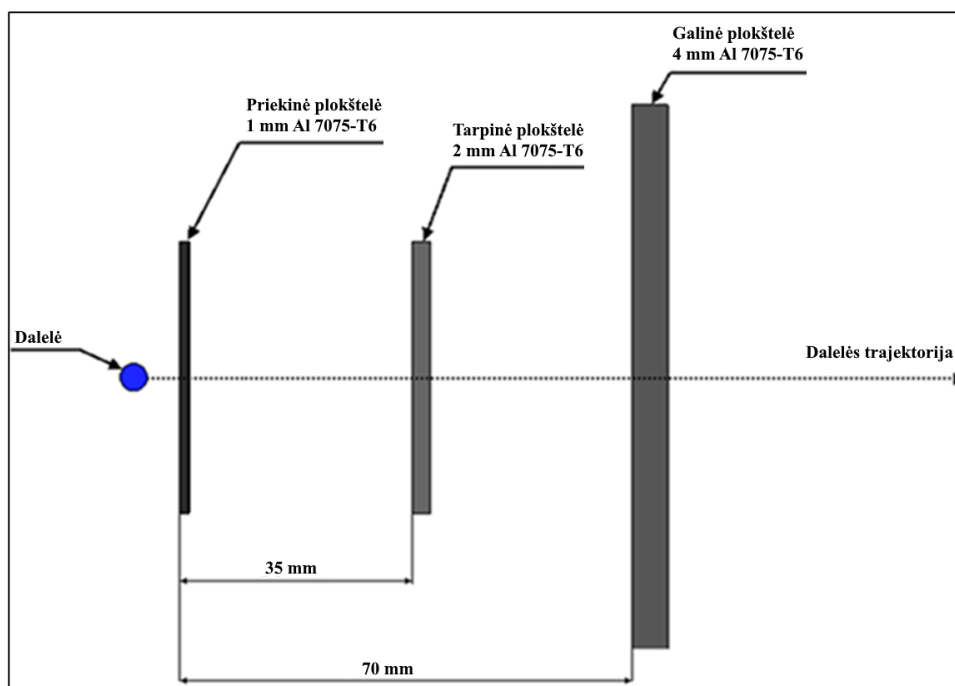
Tarpinės plokštelės tyrimuose naudojama antra, 2 mm storio Al 7075-T6 plokštelė, uždėta tarp priekinės ir galinės plokštelių. Atstumas tarp priekinės ir tarpinės plokštelių yra 35 mm. Siekiant nustatyti kaip atstumas tarp skydo plokštelių įtakoja jo efektyvumą, atliktas papildomas tyrimas 6-70:02. Tyrime atstumas tarp priekinės ir tarpinės plokštelių padidintas nuo 35 iki 60 mm.

Tyrimams priskiriamas numeris 02, rezultatai pateikti 5 lentelėje (tyrimų vaizdai ir energijos grafikai pateikti 7 priede). Priekinės plokštelės įtrūkimai nematuojami - jie identiški bazinio efektyvumo tyrimų ekvivalentams. Tarpinės plokštelės skydo schema parodyta 14 paveikslėlyje.

5 lentelė. Tarpinės plokštelės tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Tarpinės plokštelės įtrūkimas d_d :	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:02	Pilna perforacija 2.0 mm	Plokštelė nepaveikta	Tarpinė plokštelė: plokštelės centras pasislinko ~3 mm trajektorijos link. Kritinis įtrūkimas. Galinė plokštelė: nekritisinis įtrūkimas.
6-70:02	Pilna perforacija 24.4 mm	Dalinė perforacija 4.8 mm – 0.4 mm	Tarpinė plokštelė: beveik visa plokštelė pasislinko ~10 mm trajektorijos link. Kritinis įtrūkimas. Galinė plokštelė: plokštelės centre krateriai. Plokštelės centras pasislinko 1 mm trajektorijos link. Nekritisinis įtrūkimas.
9-90:02	Pilna perforacija 33.2 mm	Dalinė perforacija 1.4 mm – 2.0 mm	Tarpinė plokštelė: beveik visa plokštelė pasislinko ~8 mm trajektorijos link. Pilnas plokštelės suirimas. Galinė plokštelė: Tris krateriai plokštelės centre. Plokštelės centras pasislinko ~9 mm trajektorijos link. Nekritisinis įtrūkimas.
6-70:02 papildoma	Pilna perforacija 13.4 mm	Minimalūs įtrūkimai	Tarpinė plokštelė: beveik visa plokštelė pasislinko ~5 mm trajektorijos link. Kritinis įtrūkimas. Galinė plokštelė: nekritisinis įtrūkimas.

¹⁹ Priekinė ir tarpinė plokštelės turi atskirus fiksavimo taškus atraminėje struktūroje.



14 pav. Tarpinės plokštelės skydo schema

Tarpinės plokštelės skydas parodė labai aukštą efektyvumą: galinės plokštelės įtrūkimai buvo sumažinti prie visų sąlygų. Tuo tarpu, išsikrus tyrime 3-35, tarpinė plokštelė patyrė didelę žalą. Papildomo tyrimo rezultatai parodė, jog padidinus atstumą tarp priekinės ir tarpinės plokštelių, galinės plokštelės įtrūkimai sumažinami iki minimalių, dėl didesnio dalelių debesėlio išsiskleidimo. Be to, tarpinė plokštelė patyrė mažesnę žalą nei standartiniame tyrime 6-70:02. Galinė plokštelė nepatyrė spaliacijos visuose tyrimuose.

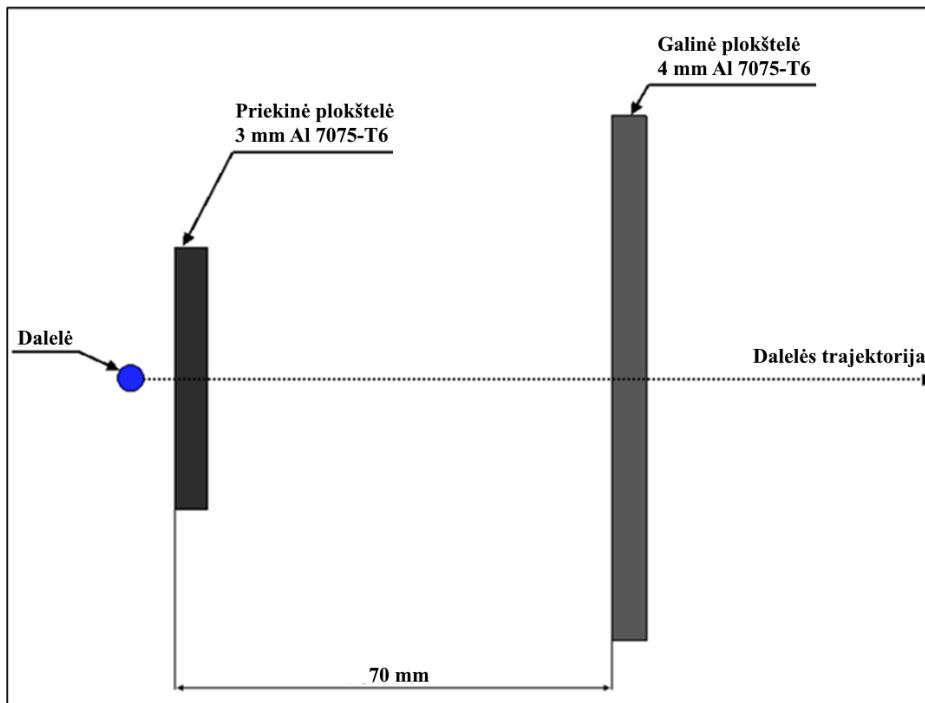
2.5.2. Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai

Padidinus priekinės plokštelės storį, padidėja dalelės kinetinės energijos praradimas smūgio metu - tai sumažina dalelių debesėlio greitį, padidina dalelės fragmentavimą. Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimuose plokštelės storis padidinamas nuo 1 iki 3 mm. Tyrimams priskiriamas numeris 03, rezultatai pateikti 6 lentelėje (tyrimų vaizdai ir energijos grafikai pateikti 8 priede). Priekinės plokštelės pakoreguoto storio skydo schema parodyta 15 paveikslėlyje.

6 lentelė. Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Priekinės plokštelės įtrūkimas d_d :	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:03	Pilna perforacija 5.8 mm	Dalinė perforacija 3.0 mm - 0.3 mm	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritinis įtrūkimas.
6-70:03	Pilna perforacija 15.8 mm	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.9 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.

9-90:03	Pilna perforacija 21.8 mm	Pilna perforacija 2.0 – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių prie plokštelės centro. Plokštelės centras pasislinko ~7 mm trajektorijos link. Pilna perforacija dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo. Kritinis įtrūkimas.
----------------	------------------------------	---	---



15 pav. Priekinės plokštelės pakoreguoto storio skydo schema

Pakoreguoto storio plokštelė parodė vidutinį efektyvumą: 3 mm storio priekinė plokštelė patyrė didesnius įtrūkimus nei bazinio skydo 1 mm plokštelė, galinės plokštelės įtrūkimai buvo sumažinti prie visų sąlygų. Tyrime 6-70 pilna perforacija buvo sumažinta iki dalinės. Išskyrus tyrime 3-35, įtrūkimai laikomi kritiniais dėl spaliacijos.

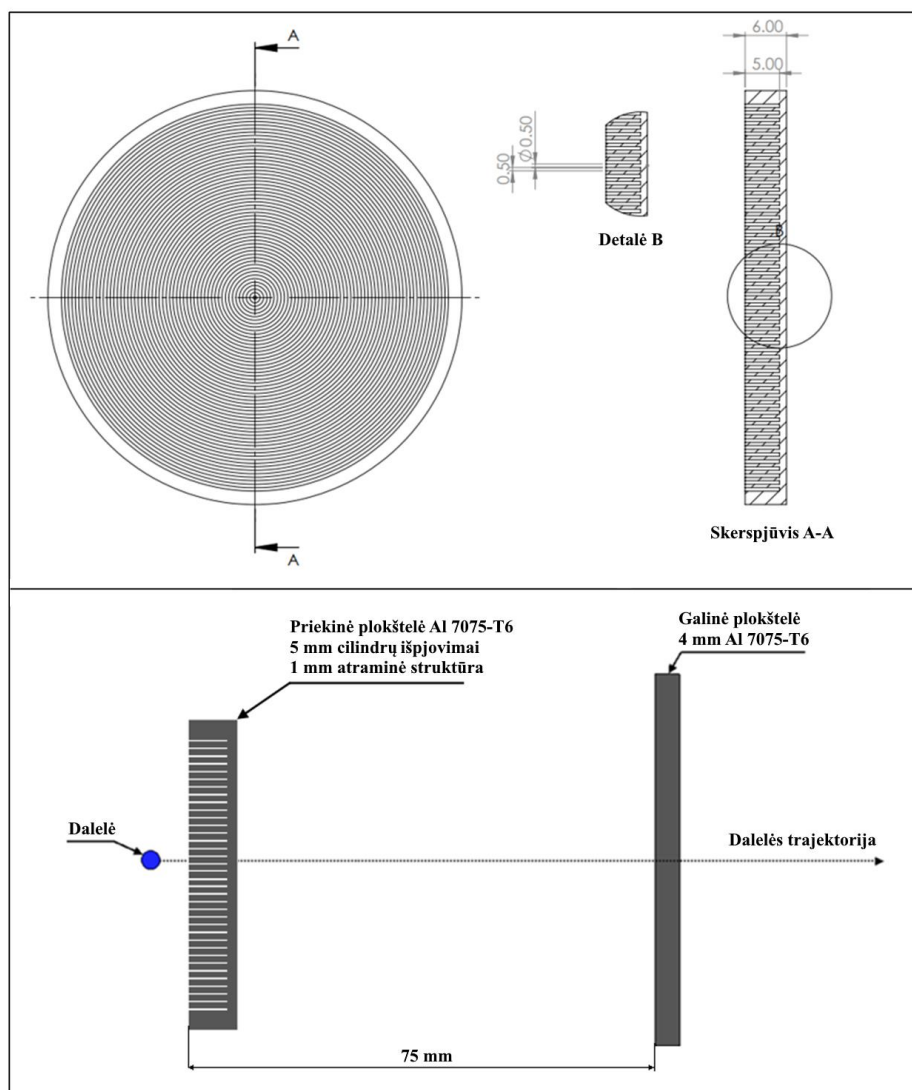
2.5.3. Priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimai

Koreguojant priekinės plokštelės paviršių, jam suteikiama cilindro išpjovimų formą (žr. 16 pav.). Formą sudaro 5 mm ilgio ir 0.5 mm storio išpjovimai. Tokie išpjovimai suteikiami 1 mm storio priekinės plokštelės paviršiui, plokštelė reikalinga kaip atraminė struktūra (viso skydo storis yra 6 mm). Atstumas tarp priekinės ir galinės plokštelių padidintas iki 75 mm. Siekiant nustatyti, kaip cilindro išpjovimų ilgis įtakoja efektyvumą, atliktas papildomas 6-70:04 tyrimas, kur išpjovimų ilgis padidintas nuo 5 iki 12 mm (viso skydo storis 13 mm). Tokios plokštelės naudojimas pagrįstas didesniu dalelės kinetinės energijos absorbuavimu ir „kanalo“ efekto pridavimu (žr. 9 priedą).

Tyrimams priskiriamas numeris 04, rezultatai pateikti 7 lentelėje (tyrimų vaizdai ir energijos grafikai pateikti 9 priede). Smūgiai atliekami į cilindro išpjovimo centrą. Pakoreguotos priekinės plokštelės struktūros skydo schema parodyta 16 paveikslėlyje.

7 lentelė. Priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Priekinės plokštelės įtrūkimas d_d :	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:04	Pilna perforacija 5.6 mm	Minimalūs įtrūkimai	Priekinė plokštelė: nuo atraminės struktūros atitrūko 12 cilindų išpjovimai. Kritinis įtrūkimas. Galinė plokštelė: vienas mažas krateris plokštelės centre. Nekritinis įtrūkimas.
6-70:04	Pilna perforacija 22.4 mm	Dalinė perforacija 1.4 mm – 2.1 mm	Priekinė plokštelė: nuo atraminės struktūros atitrūko 27 cilindų išpjovimų. Pilnas plokštelės suirimas. Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Plokštelės centras pasislinko ~2 mm trajektorijos link. Nekritinis įtrūkimas.
9-90:04	Pilna perforacija 33.4 mm	Dalinė perforacija 2.0 – 2.1 mm Spaliacija	Priekinė plokštelė: pilnas plokštelės suirimas. Galinė plokštelė: tris krateriai, pagrindinis plokštelės centre. Plokštelės centras pasislinko ~4 mm trajektorijos link.. Kritinis įtrūkimas.
6-70:04 papildoma	Pilna perforacija 32.0 mm	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.9 mm	Priekinė plokštelė: pilnas plokštelės suirimas. Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritinis įtrūkimas.



16 pav. Priekinės plokštelės pakoreguotos struktūros skydo schema

Cilindrų išpjovimų formos skydas parodė aukštą efektyvumą: nors galinės plokštelės įtrūkimai buvo žymiai sumažinti visuose tyrimuose, priekinė plokštelė nesuiro tik tyrime 3-35 (kur ji patyrė didelę žalą, atitrūko pusė išpjovimų). Atliktas papildomas tyrimas parodė, jog padidinus išpjovimų ilgį, sumažinama žala galinei plokštei: plokštelė nepatyrė spaliacijos, įtrūkimas nekritinis. Cilindrų išpjovimai priduoda „kanalo“ efektą debesėliui, t.y. nukreipia kai kurių debesėlio fragmentus nuo pirminės trajektorijos (žr. 9 priedą). Tai įtakoja debesėlio išsiskleidimą.

2.5.4. Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai

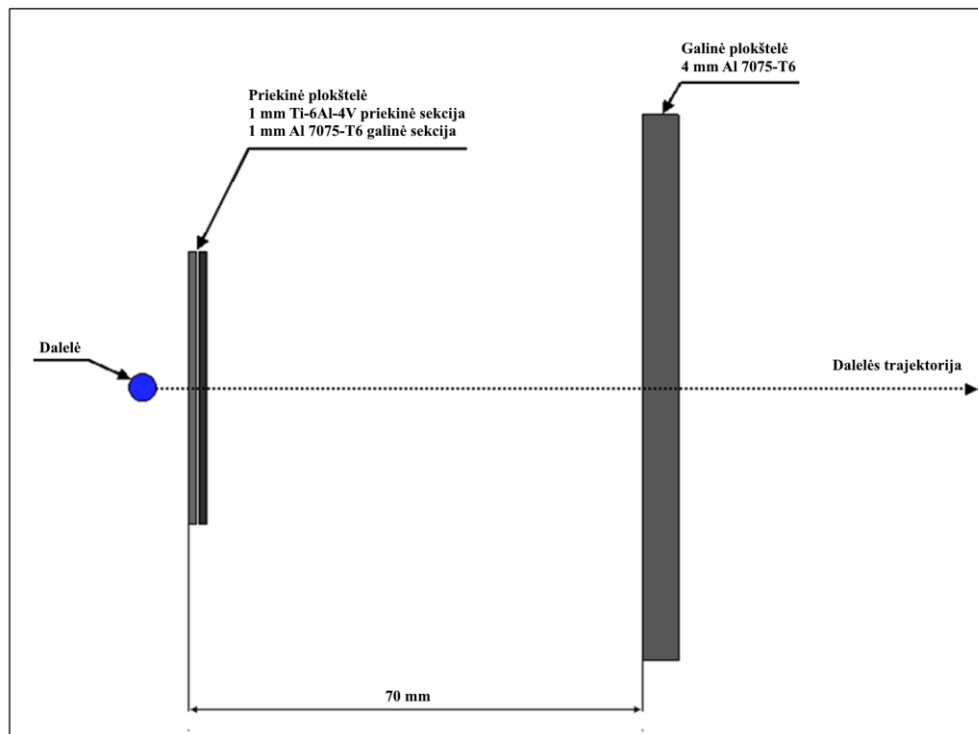
Koreguojant medžiaga, priekinė plokštelė padalinama į dvi sekcijas, abi 1 mm storio. Priekinę sekciją sudaro titano Ti-6Al-4V lydinis, galinę - aliuminio Al7075-T6. Titano panaudojimas pagrįstas didesniu šios medžiagos tankiu - smūgio metu, dalelė praranda daugiau kinetinės energijos ir fragmentuojasi daugiau. Antra sekcija naudojama kaip atraminė struktūra, tuo atveju, jei pirmą bus perforuota. Atstumas tarp sekcijų yra 0.1 mm. Atliktas papildomas 6-70:05 tyrimas, kur sekcijų medžiagos keičiamos tarpusavyje. Pabrėžiama, jog tai nėra dviejų atskirų plokštelių skydas - modeliuojama struktūra, kur ant vieno fiksavimo taško uždėta viena plokštele, ją sudaro dvi sekcijos

(toks skydo patobulinimas laikomas pusiau struktūriniu, pusiau medžiaginiu). Pakoreguotos medžiagos plokštelė yra vienas kūnas, tuo tarpu, tarpinė plokštelė būtų laikoma antru, atskiru kūnu.

Tyrimams priskiriamas numeris 05, rezultatai pateikti 8 lentelėje (tyrimų vaizdai ir energijos grafikai pateikti 10 priede). Pakoreguotos priekinės plokštelės medžiagos skydo schema parodyta 17 paveikslėlyje.

8 lentelė. Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Priekinės plokštelės įtrūkimas $d_{d1} - d_{d2}$:	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:05	Pilna perforacija 5.0 mm – 6.4 mm	Dalinė perforacija 4.6 mm – 0.7 mm	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritinis įtrūkimas.
6-70:05	Pilna perforacija 11.2 mm – 15.6 mm	Dalinė perforacija 1.2 mm – 0.3 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.
9-90:05	Pilna perforacija 24.6 mm – 22.4 mm	Pilna perforacija 0.7 mm – 4 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių visame plokštelės paviršiuje. Plokštelė patyrė didelę spaliaciją. Kritinis įtrūkimas. Pilna perforacija dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo.
6-70:05 papildoma	Pilna perforacija 18.6 mm – 21.0 mm	Pilna perforacija 4.8 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas. Pilna perforacija dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo.



17 pav. Priekinės plokštelės pakoreguotos medžiagos skydo schema

Pakoreguotos priekinės plokštelės medžiagos skydas parodė vidutinį efektyvumą: galinės plokštelės įtrūkimai buvo sumažinti, bet plokštelė vis tiek patyrė spaliacija visuose tyrimuose, išskyrus 3-35. Tyrime 9-90 plokštelė patyrė pilną perforaciją dėl per didelio medžiagos vientisumo praradimo (spaliacijos). Papildomame tyrime 6-70:05, po debesėlio smūgio galinėje plokštelėje susiformavo didesnis įtrūkimas nei standartiniame tyrime. Galimai tai yra dėl to, kad dalelių debesėlyje buvo daugiau titano nei aliuminio medžiagos (žr. 10 priedą). Titano medžiaga koncentravosi debesėlio centre. Tyrimo vaizdai atskleidė, kad po smūgio sekcijoms būdingas pasislinkimas nuo bendros vertikalės, tarp sekcijų prie įtrūkimo vietos formuojasi tarpas (žr. 10 priedą).

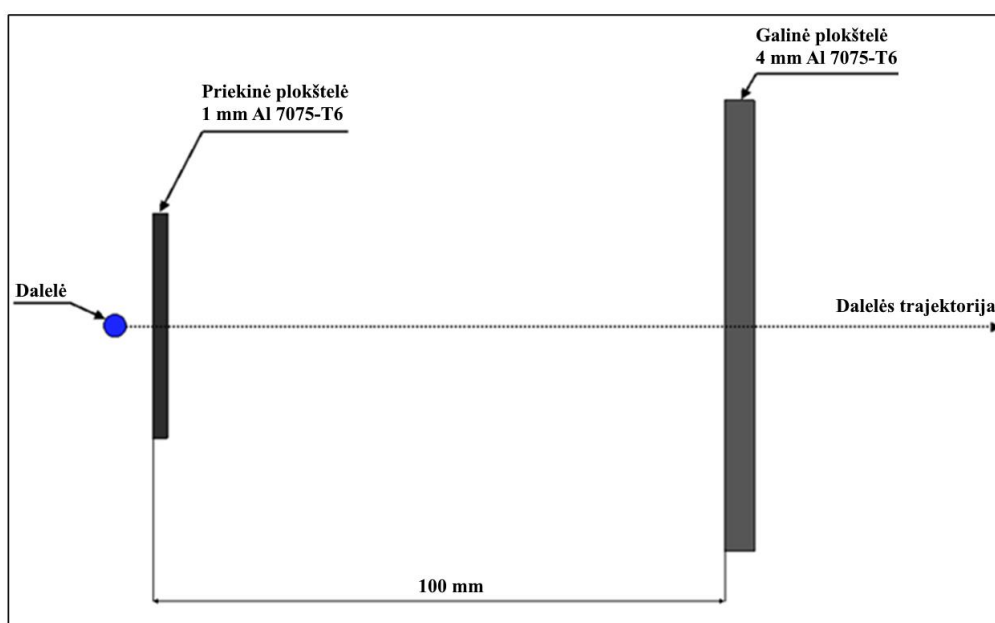
2.5.5. Priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimai

Padidinus atstumą tarp priekinės ir galinės plokštelių, dalelių debesėlis išsiskleis daugiau prieš smūgį į galinę plokštelę. Tai pavers debesėlio fragmentus smūgiuoti per didesnę galinės plokštelės plotą, kas sukels daugiau mažesnių įtrūkimų plokštelėje (vietoj vieno gilaus centre).

Tyrimuose atstumas tarp priekinės ir galinės plokštelių padidinamas nuo 70 iki 100 mm. Modelių atlikimo laikas padidinamas nuo 80 iki 100 μ s. Tyrimams priskiriamas numeris 06, rezultatai pateikti 9 lentelėje (tyrimų vaizdai ir energijos grafikai pateikti 11 priede). Priekinės plokštelės įtrūkimai nematuojami - jie identiški bazinio efektyvumo tyrimų ekvivalentams. Pakoreguoto atstumo skydo schema parodyta 18 paveikslėlyje.

9 lentelė. Priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:	
	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:06	Dalinė perforacija 3.4 mm – 0.6 mm Spaliacija	Vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.
6-70:06	Minimalūs įtrūkimai	Daug mažų kraterių plokštelės centre. Plokštelė pasislinko ~0.8 mm trajektorijos link. Nekritinis įtrūkimas.
9-90:06	Pilna perforacija 6.4 mm – 4.0 mm Spaliacija	Kritinis įtrūkimas. Plokštelės centras pasislinko ~12 mm trajektorijos link.



18 pav. Priekinės plokštelės pakoreguoto atstumo skydo schema

Pakoreguoto atstumo skydas parodė vidutinį efektyvumą: tyrime 3-35 galinės plokštelės įtrūkimai sumažinti nežymiai (dėl būdingo balistinio greičio debesėliui mažo išsiskleidimo) ir išliko kritiniais (spaliacija). Fragmentavimo greičio tyrimas 6-70 parodė labai aukštą efektyvumo prieaugį - galinės plokštelės įtrūkimai sumažinti iki minimalių. Tyrime 9-90 galinėje plokštelėje susiformavusi pilna perforacija žymiai mažesne nei bazinio skydo. Be to, plokštelė patyrė mažesnę nei bazinio skydo spaliaciją (kritinis įtrūkimas)

3. Skydų patobulinimų tyrimo rezultatai

Tyrimų rezultatai lyginami tam, kad atskleisti kokie skydų patobulinimai parodo aukščiausią efektyvumo prieaugį lyginant su baziniu skydu. Palyginimui naudojami energijos rezultatai ir galinės plokštelės įtrūkimai: skersmuo, gylis, spaliacijos fenomenas (jei toks buvo užfiksuotas). Lyginant rezultatus, įtrūkimo gyliui suteikiamas prioritetas prieš skersmenį.

3.1. Tyrimų rezultatų analitika

Toliau pateikiami ir aptariami kinetinės ir vidinės energijos rezultatai (vertės). Rezultatai užfiksuojami viso modelio atlikimo laiku ir pateikiami kaip energijos priklausomybės nuo laiko grafikai. Grafikai pažymėti pagal jų tyrimų kodus: 01 – bazinio skydo, 02 – tarpinės plokštelės, 03 – koreguoto storio, 04 – koreguotos struktūros, 05 – koreguotos medžiagos, 06 – koreguoto atstumo. Pilna linija braižomi kinetinės energijos grafikai, brūkšniuota linija – vidinės. Smūgiuojančios dalelės grafikai yra juodos spalvos, priekinės plokštelės (tyrime 05 - aliuminio sekcijos) – žalios, priekinės plokštelės titano sekcijos – žydros, tarpinės plokštelės – geltonos, galinės plokštelės – raudonos. Pabrėžiama, jog grafikai parodo skirtingus laikus: tyrimuose, kur dalelių debesėlis sulėtėjo iki mažesnio nei hiper-greitis greičio (<0.8 km/s) rezultatai užfiksuojami ankščiau laiko apribojimo. Taip pat pabrėžiama, jog smūgio metu, kai kurie dalelės ir skydų fragmentai išmušami priešingos trajektorijos link - jų nenulinis greitis, masė, temperatūra ir kitos savybės įtakoja fiksuojamų energijų vertes²⁰.

Siekiant palyginti, kaip patobulinimai įtakoja smūgiuojančios dalelės kinetinės energijos praradimą ir pridudamą galinei plokštei visą energiją, patobulintų skydų paminėtos energijos vertės normalizuojamos pagal bazinio skydo vertes. Visa energija yra kinetinės ir vidinės energijų suma. Įvedamos sekančios vertės:

- $Ek_{d\ loss}$ – dalelės kinetinės energijos praradimas po smūgio į skydą²¹ [J];
- $\Delta Ek_{d\ loss}$ – dalelės kinetinės energijos praradimas, normalizuotas pagal bazinio skydo vertę;
- $Etot_{gp}$ – priduta galinei plokštei visa energija [J];
- $\Delta Etot_{gp}$ – priduta galinei plokštei energija, normalizuota pagal bazinio skydo vertę;
- Δd_d – galinės plokštelės įtrūkimo skersmuo, normalizuotas pagal bazinio skydo vertę (neužfiksuojamas, jei plokštelė nepaveikta);
- Δd_h – likęs po smūgio galinės plokštelės storis (kaip procentas nuo pradinio 4 mm storio).

Pateikiamuose paveikslėliuose pirmoje eilutėje parodyta galinės plokštelės įtrūkimų vietos medžiagos būseną (žalia – elastiška, žydra – plastinė, violetinė – atitrūkusi/suirusi X-X plokštumoje), iš kairės į dešinę: bazinio skydo, aukščiausio efektyvumo, aukšto efektyvumo, vidutinio efektyvumo prieaugio skydų. Antroje eilutėje parodyti bendri bazinio ir trijų efektyviausių patobulintų skydų galinės plokštelės įtrūkimų vietos vaizdai, paminėta tvarka. Lentelėse tyrimai pateikiami iš viršaus į apačią, paminėta tvarka.

²⁰ AUTODYN įrašo visų elementų, priskirtų tai arba kitai medžiagai, energijos vertes.

²¹ Jei kalbama apie tarpinės plokštelės skydą - dalelės kinetinės energijos praradimas po smūgio į tarpinę plokštelę.

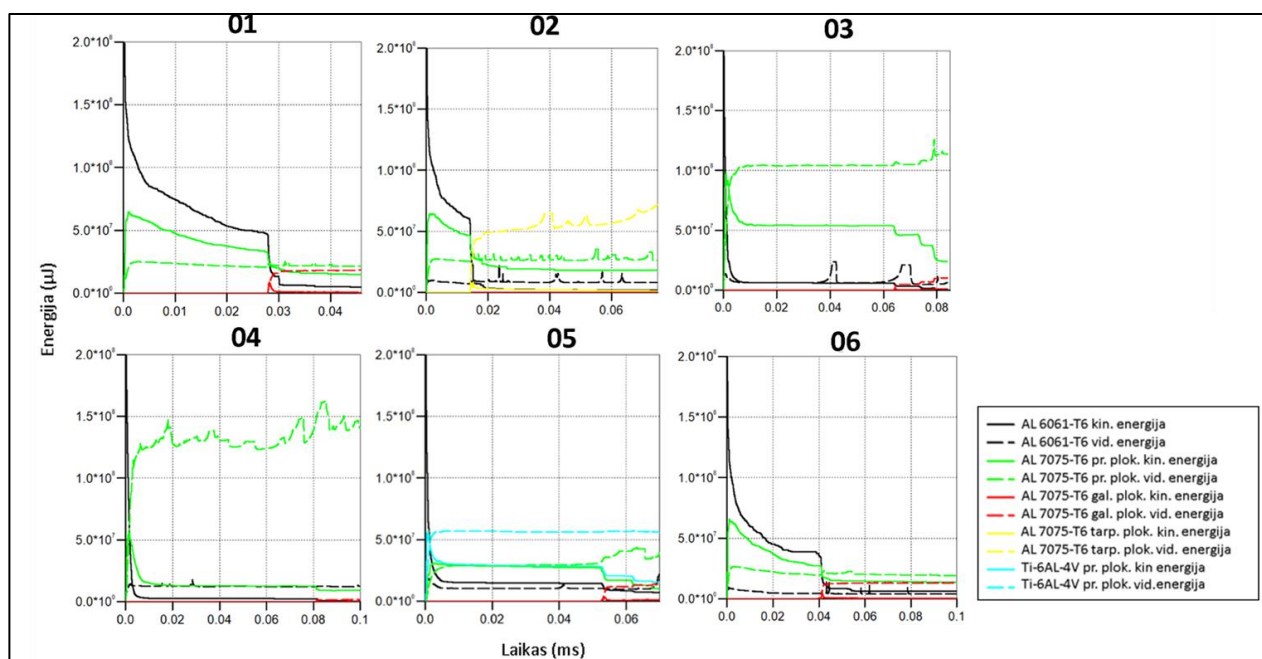
3.2. Tyrimų 3-35 rezultatai

Dalelėms, judančioms balistiniais greičiais (1-3.5 km/s), būdingas nepilnas fragmentavimas, todėl susiformavusį dalelių debesėlį sudaro (santykinai) dideli nesuirę skydo ir dalelės fragmentai (žr. 13 pav.) Toks debesėlis išsiskleidžia mažai, jo kinetinė energiją yra koncentruotą debesėlio centre. 3-35 dalelės pradinė kinetinė energija yra 226 J.

Bazinio efektyvumo tyrime, galinė plokštelė patyrė dalinę perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo ir gylis yra 3.8 ir 1.2 mm atitinkamai (01, žr. 20 pav.). Be to, plokštelė patyrė spaliaciją – įtrūkimas laikomas kritiniu. Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 88 J (žr. 19 pav.), po smūgio į galinę plokštelę, energija sumažėjo iki 5.3 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 33 J prieš smūgį į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 14 J. Galinei plokštei priduta visa energija 19 J, iš kurios 18.3 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 138 J po smūgio į skydą.

Geriausią efektyvumo prieaugį tyrime 3-35 parodė tarpinės plokštelės skydas: dalelių debesėlis buvo sustabdytas po smūgio į tarpinę plokštelę. Tuo tarpu, tarpinė plokštelė buvo pilnai perforuota – nuo plokštelės atitrūkusį medžiaga sulėtėjo iki ~0.4 km/s po smūgio. Galinėje plokštelėje nesusiformavo matomų įtrūkimų (02, žr. 20 pav.), įtrūkimas yra nekritis. Be to, tarpinės plokštelės įtrūkimai, nors kritiniai, yra pakankamai maži ir pagrindžia tolimesnį tokio skydo naudojimą.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 88 J, po smūgio į tarpinę plokštelę, energija sumažėjo iki 2.0 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 46 J prieš smūgį į tarpinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 19 J. Atitrūkusios nuo tarpinės plokštelės medžiagos energija buvo 2.2 J. Galinei plokštei priduta visa energija 0.17 J, iš kurios 0.16 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 224 J po smūgio į skydą.



19 pav. Tyrimų 3-35 kinetinės ir vidinės energijos grafikai.

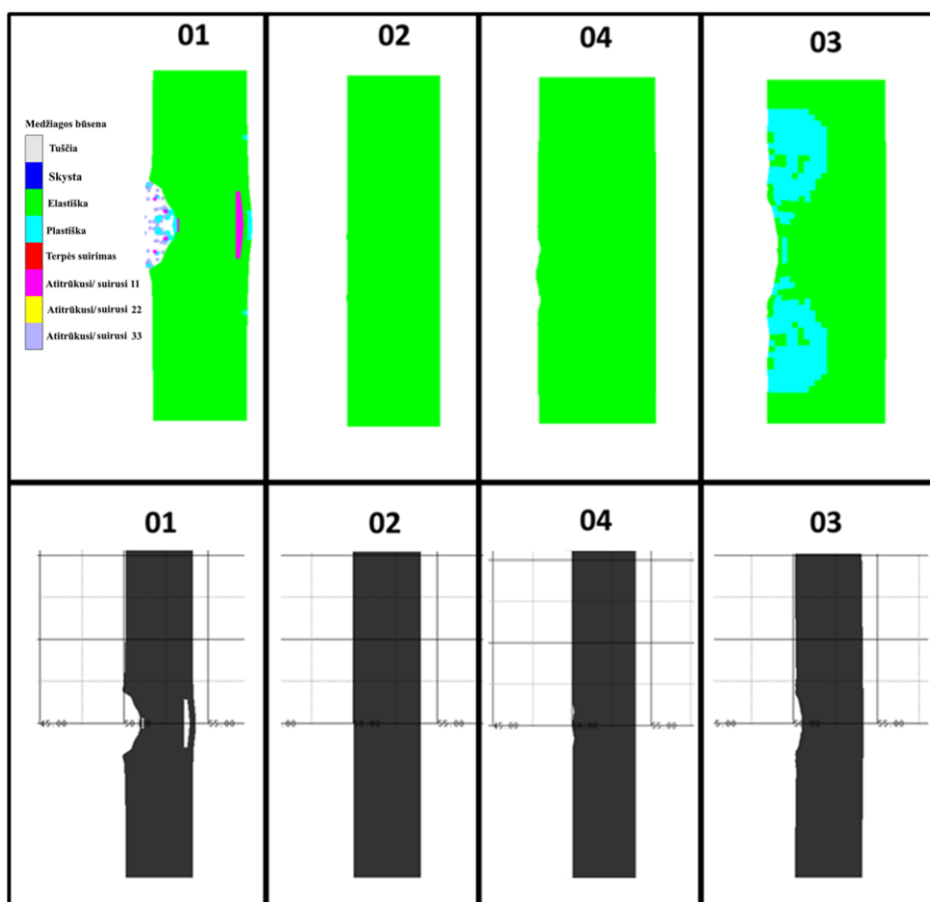
Antrą geriausią efektyvumo prieaugį parodė pakoreguotos struktūros skydas: galinė plokštelė patyrė minimalius įtrūkimus (04, žr. 20 pav.). Tokiam įtrūkimui priskiriamas maksimalus minimalių

įtrūkimų gylis – 0.2 mm, skersmuo ~1.8 mm. Plokštelė nepatyrė spaliacijos, įtrūkimas yra nekritis. Koreguota struktūra patyrė didelę žalą – pusė (12) cilindro išpjovimų atitrūko nuo atraminės struktūros. Tolimesnis tokio skydo naudojimas būtų neefektyvus.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 2.7 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 12.5 J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 9 J. Galinei plokštei priduta visa energija 1.8 J, iš kurios 1.6 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 223.3 J po smūgio į skydą.

Trečią geriausią efektyvumo priaugį parodė pakoreguoto storio skydas: galinė plokštelė patyrė dalinę perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo ir gylis yra 3.0 ir 0.4 mm atitinkamai (03, žr. 20 pav.). Plokštelė nepatyrė spaliacijos, įtrūkimas yra nekritis. Plokštelė patyrė žymią plastinę deformaciją prie plokštelės priekinio paviršiaus centro. Tokio skydo priekinė plokštelė patyrė didesnius įtrūkimus nei bazinio skydo, kadangi daugiau skydo medžiagos sugeria dalelės energiją.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 6.3 J, po smūgio į galinę plokštelę sumažėjo iki 1 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 53 J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 24 J. Galinei plokštei priduta visa energija 11 J, iš kurios 10.1 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 219.7 J.



20 pav. Tyrimų 3-35 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai

Mažiausią efektyvumo priaugį parodė atstumo koregavimo skydas: galinės plokštelės įtrūkimo gylis sumažėjo dvigubai, nuo 1.2 iki 0.6 mm, bet skersmuo pasikeitė nežymiai. Be to, plokštelė, kaip ir bazinio skydo tyrime, patyrė spaliaciją – įtrūkimas laikomas kritiniu. Kadangi balistinio greičio

dalelei būdingas labai mažas išsiskleidimas, didinat atstumą efektyvumo prieaugis padidėja nežymiai. Koreguotos medžiagos skydo galinėje plokštelėje susiformavo didesnis įtrūkimas nei koreguoto atstumo skydo ekvivalente, bet plokštelė nepatyrė spaliacijos (nekritinis įtrūkimas). Užfiksuoti energijos ir įtrūkimų faktoriai pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Tyrimų 3-35 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai

Tyrimas:	Energijos vertės:		Normalizuotos energijos vertės:		Galinės plokštelės įtrūkimai:	
	$Ek_{d\ loss}$	$Etot_{gp}$	$\Delta Ek_{d\ loss}$	$\Delta Etot_{gp}$	$d_d / \Delta d_d$	$d_h / \Delta d_h$
01	178 J	19 J	1	1	3.8 mm / 1	1.2 mm / 70 %
02	222.9 J	0.17 J	1.252	0.008	Nepaveikta	0 mm / 100 %
04	223.3 J	1.8 J	1.254	0.094	1.8 mm / 0.47	0.2 mm / 95 %
03	219.7 J	11 J	1.234	0.57	3.0 mm / 0.78	0.4 mm / 90 %

3.3. Tyrimų 6-70 rezultatai

Tyrimuose 6-70 dalelės fragmentavosi į dalelių debesėlį. Debesėlį daugumoje sudaro dalelės fragmentai, skydo medžiagos yra mažiau. Fragmentai koncentruoti debesėlio priekinio regiono centre. Toks debesėlis išsiskleidžia judant sekančio paviršiaus link. 6-70 dalelės pradinė kinetinė energija yra 7300 J. Tyrimams 02 ir 04 naudojami papildomų tyrimų rezultatai.

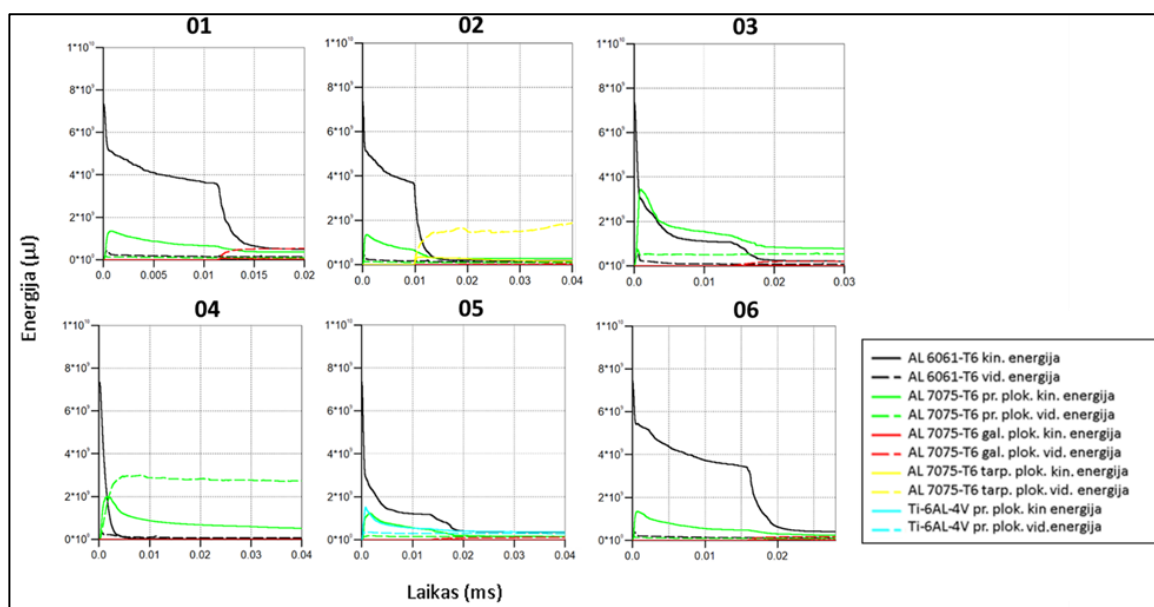
Bazinio efektyvumo tyrime, galinė plokštelė patyrė pilną perforaciją, kurios skersmuo yra 1.4 mm (01, žr. 22 pav.). Plokštelėje susiformavęs kraterio gylis yra 2.8 mm²², bet dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo ir dėl spaliacijos, įtrūkimas laikomas kritiniu. Plokštelės medžiaga patyrė plastinę deformaciją, ypač žymiai prie galinio paviršiaus. Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 5200 J (žr. 21 pav.), po smūgio į galinę sumažėjo iki 500 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 630 J prieš smūgį į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 362 J. Galinei plokštei priduta visa energija 570 J, iš kurios 553 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 2100 J po smūgio į skydą.

Geriausią efektyvumo prieaugį tyrime 6-70 parodė tarpinės plokštelės skydas (papildoma). Dalelių debesėlis sustabdytas po smūgio į tarpinę plokštelę. Nuo tarpinės plokštelės atitrūko didelė medžiagos dalis, kuri smūgiavo galinę plokštelę prie maždaug 0.8 km/s. Dėl šio smūgio plokštelės centras pasislinko ~1.0 mm trajektorijos link. Tai nesukėlė matomų įtrūkimų, bet plokštelės medžiaga patyrė plastinę deformaciją (02, žr. 22 pav.), įtrūkimas yra nekritinis. Tarpinės plokštelės įtrūkimas laikomas per dideliu tolimesniam optimaliam naudojimui. Pabrėžiama, kad standartiniame tyrime 6-70:02, nuo tarpinės plokštelės atitrūkusią medžiagą po smūgio į galinę plokštelę sukėlė dalinę perforaciją - standartinis tarpinės plokštelės skydas būtų laikomas trečiu geriausiu efektyvumo prieaugiu (vietoj koreguotos struktūros).

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 5200 J, po smūgio į tarpinę plokštelę sumažėjo iki 130 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo

²² Šiuo atveju, likęs skydo storis buvo ~0.5 mm, matuojant nuo kraterio giliausio taško iki paskutinio, nepatyrusio spaliacijos, medžiagos elemento. Tokiu būdu, įtrūkimo gylis yra 87.5 % nuo viso storio.

630 J prieš smūgi į tarpinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 330 J. Atitrūkusios nuo tarpinės plokštelės medžiagos energija buvo 250 J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 140 J. Galinei plokštei priduta visa energija 40 J, iš kurios 27 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 7170 J po smūgio į skydą.



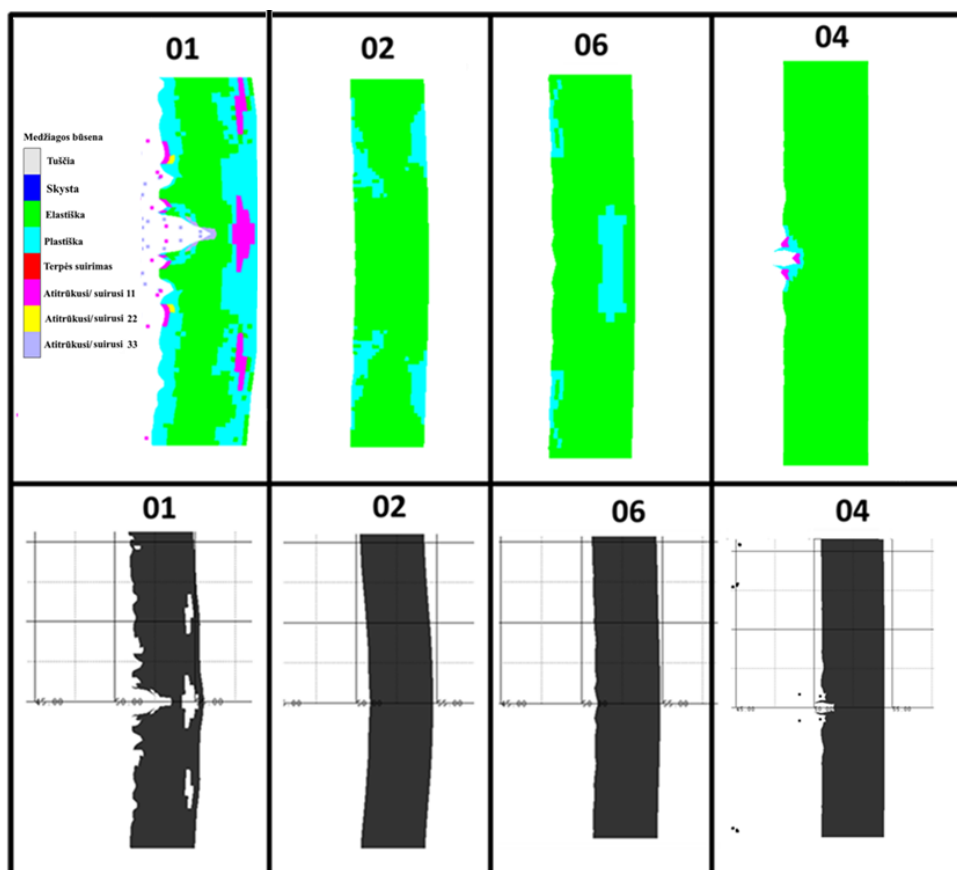
21 pav. Tyrimų 6-70 kinetinės ir vidinės energijos grafikai

Antrą geriausią efektyvumo prieaugį parodė pakoreguoto atstumo skydas: galinė plokštelė patyrė minimalius įtrūkimus (06, žr. 22 pav.). Tokiam įtrūkimui priskiriamas maksimalus minimalių įtrūkimų gylis – 0.2 mm, skersmuo ~2.0 mm. Dalelių debesėlis sėkmingai išsiskleidė prieš pasiekiant galinę plokštelę. Galinės plokštelės centre susiformavo maži įtrūkimai, jos medžiaga patyrė plastinę deformaciją plokštelės viduje. Įtrūkimas yra nekritinis.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 5200 J, po smūgio į galinę plokštelę sumažėjo iki 400 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 480 J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 230 J. Galinei plokštei priduta visa energija 190 J, iš kurios 164 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 2100 J po smūgio į skydą (energijos praradimas dėl debesėlio išsiskleidimo neskaičiuojamas).

Trečią geriausią efektyvumo prieaugį parodė pakoreguotos struktūros skydas: galinė plokštelė patyrė dalinę perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo ir gylis yra 0.8 ir 0.9 mm atitinkamai (04, žr. 22 pav.). Plokštelė nepatyrė spaliacijos, įtrūkimas yra nekritinis. Plokštelė patyrė nežymią plastinę deformaciją priekinio paviršiaus centre. Priekinė plokštelė visiškai suiro.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 140 J, po smūgio į galinę plokštelę sumažėjo iki 7 J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 640 J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 370 J. Galinei plokštei priduta visa energija 55 J, iš kurios 51 J yra vidinė energija. Dalelė prarado 7160 J po smūgio į skydą.



22 pav. Tyrimų 6-70 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai

Mažiausią efektyvumo prieaugį parodė pakoreguotos medžiagos skydas. Kadangi titano tankis yra beveik dvigubai didesnis nei aliuminio, atrūkusi nuo priekinės plokštelės sunkesnė medžiaga buvo koncentruota debesėlio centre ir neišsiskleidė pakankamai. Tokio debesėlio smūgis sukėlė dalinę perforaciją, plokštelė patyrė spaliaciją. Galimai sumažinus titano sekcijos storį, dalelių debesėlyje būtų mažiau titano fragmentų. Papildomo tyrimo 6-70:05 energijos grafikas (žr. 10 priedą) atskleidė, jog taikant titaną galinei priekinės plokštelės sekcijai, titanui pridudama didesnė kinetinė energija nei standartiniame tyrime. Dėl to, dalelių debesėliui, kurį daugumoje sudaro titanas, būdingas dar mažesnis išsiskleidimas. Papildomo tyrimo galinė plokštelė patyrė pilną perforaciją dėl per didelio medžiagos vientisumo praradimo²³. Užfiksuoti energijos ir įtrūkimų faktoriai pateikiami 11 lentelėje.

11 lentelė. Tyrimų 6-70 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai

Tyrimas:	Energijos vertės:		Normalizuotos energijos vertės:		Galinės plokštelės įtrūkimai:	
	$E_{k_{d\ loss}}$	$E_{tot_{gp}}$	$\Delta E_{k_{d\ loss}}$	$\Delta E_{tot_{gp}}$	$d_d / \Delta d_d$	$d_h / \Delta d_h$
01	2100 J	570 J	1	1	1.4 mm / 1	4 mm / 0 %
02	7170 J	40 J	3.41	0.07	Nepaveikta	0 mm / 100 %
06	2100 J	190 J	1	0.33	2.0 mm / 1.42	0.2 mm / 95 %
04	7160 J	55 J	3.40	0.09	0.8 mm / 0.57	0.9 mm / 77.5 %

²³ Šiuo atveju, likęs skydo storis buvo ~0.6 mm, matuojant nuo kraterio giliausio taško iki paskutinio, nepatyrusio spaliacijos, medžiagos elemento. Tokiu būdu, įtrūkimo gylis yra 85 % nuo viso storio.

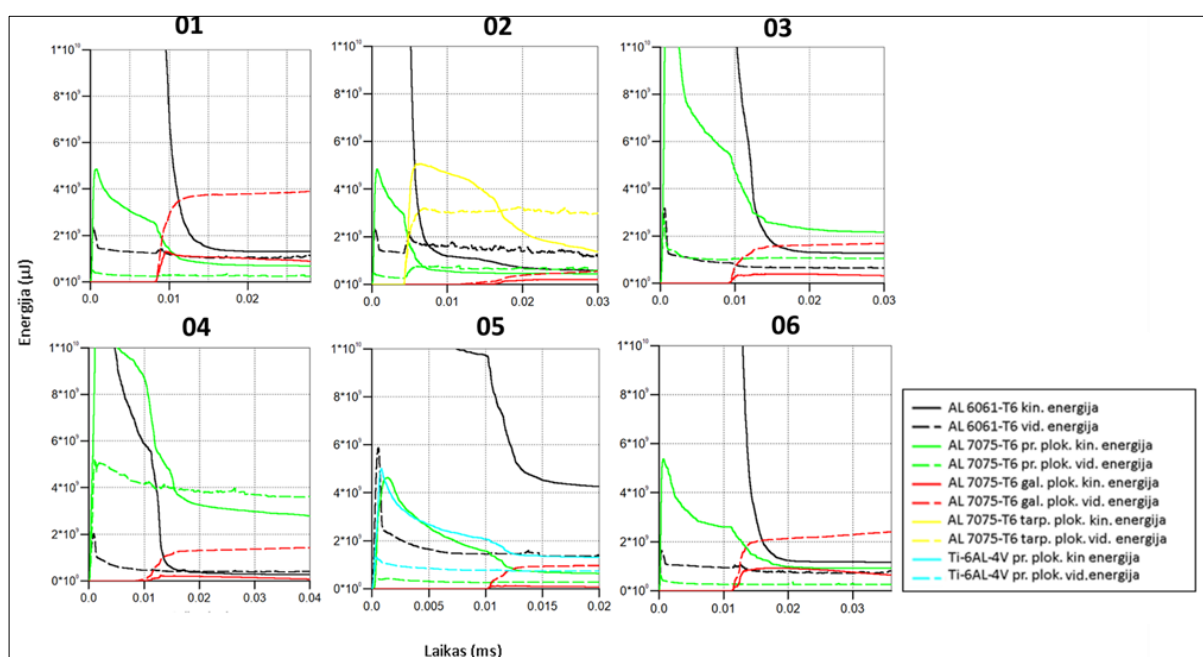
3.4. Tyrimų 9-90 rezultatai

Tyrimuose 9-90 smūgiuojama labai pavojinga dalele: tokia dalelė fragmentuojasi, bet išlaiko didelį greitį. Debesėlis išsiskleidžia daugiau nei kituose tyrimuose. 9-90 dalelės pradinė kinetinė energija yra 4.1×10^{10} J.

Bazinio efektyvumo tyrime, galinė plokštelė patyrė pilną perforaciją, kurios skersmuo yra 24.8 mm (01, žr. 24 pav.). Plokštelė patyrė spaliaciją – įtrūkimas laikomas kritiniu. Plokštelės medžiaga patyrė žymią plastišką deformaciją. Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 3.0×10^{10} J, po smūgio į galinę plokštelę dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 0.13×10^{10} J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 0.30×10^{10} J prieš smūgį į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 0.07×10^{10} J. Galinei plokštei priduta visa energija 0.48×10^{10} J, iš kurios 0.39×10^{10} J yra vidinė energija. Dalelė prarado 1.1×10^{10} J po smūgio į skydą (žr. 23 pav.).

Geriausią efektyvumo prieaugį tyrime 9-90 parodė tarpinės plokštelės skydas: galinė plokštelė patyrė dalinę perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo ir gylis yra 1.4 ir 2.0 mm atitinkamai (02, žr. 24 pav.). Plokštelė nepatyrė spaliacijos, įtrūkimas yra nekritis. Plokštelės medžiaga patyrė žymią plastinę deformaciją, ypač plokštelės galinėje dalyje. Tarpinė plokštelė patyrė labai didelę žalą. Tolimesnis tokio skydo naudojimas būtų neefektyvus.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 3.0×10^{10} J, po smūgio į tarpinę plokštelę sumažėjo iki 0.12×10^{10} J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 0.35×10^{10} J prieš smūgį į tarpinę plokštelę, po smūgio, sumažėjo iki 0.05×10^{10} J. Atitrūkusios nuo tarpinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 0.44×10^{10} J prieš smūgį į galinę plokštelę, po smūgio, energija iki 0.10×10^{10} J. Galinei plokštei priduta visa energija 0.08×10^{10} J, iš kurios 0.06×10^{10} J yra vidinė energija. Dalelė prarado 3.98×10^{10} J po smūgio į skydą (žr. 23 pav.).



23 pav. Tyrimų 9-90 kinetinės ir vidinės energijos grafikai

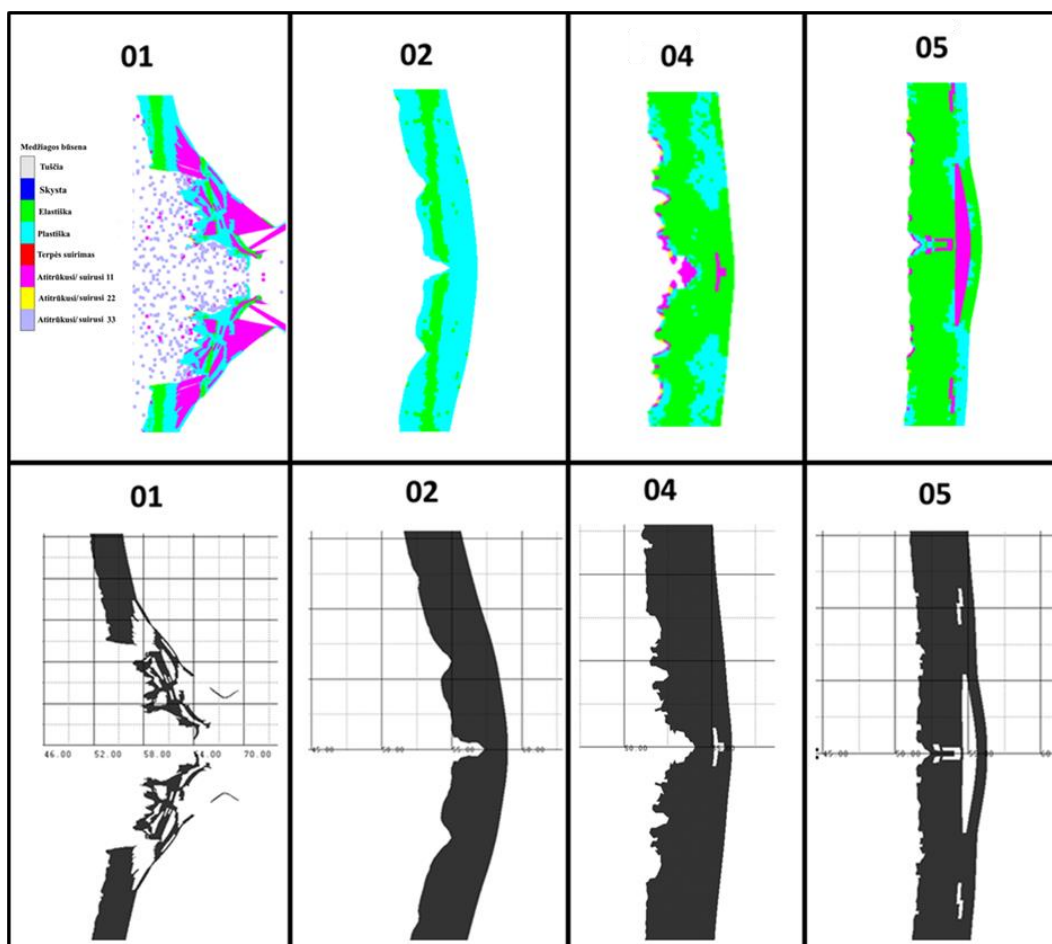
Antrą geriausią efektyvumą praeigę parodė pakoreguotos struktūros skydas: galinė plokštelė patyrė dalinę perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo ir gylis yra 2.0 ir 2.4 mm atitinkamai (04, žr. 24 pav.). Plokštelė patyrė spaliaciją, įtrūkimas laikomas kritiniu. Plokštelės medžiaga patyrė plastinę deformaciją plokštelės viduje. Priekinė plokštelė visiškai suiro.

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 1.7×10^{10} J, po smūgio į galinę plokštelę sumažėjo iki 0.04×10^{10} J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės medžiagos kinetinė energija buvo 0.75×10^{10} J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 0.21×10^{10} J. Galinei plokštei priduta visa energija 0.16×10^{10} J, iš kurios 0.15×10^{10} J yra vidinė energija. Dalelė prarado 2.4×10^{10} J po smūgio į skydą.

Trečią geriausią efektyvumą parodė pakoreguotos medžiagos skydas: galinė plokštelė patyrė pilną perforaciją, kurios įtrūkimo skersmuo yra 0.7 mm^{24} (05, žr. 23 pav.). Įtrūkimas laikomas kritiniu. Plokštelės medžiaga patyrė nežymią plastinę deformaciją galinėje plokštelės dalyje. Pabrėžiama, jog galinėje plokštelėje susiformavo mažesnis įtrūkimas nei koreguotos struktūros tyrime, bet šiuo atveju, spaliacijos reiškiniui suteikiama pirmenybę (spaliacija, t.y. medžiagos vientisumo praradimas, yra mažesnė koreguotos struktūros tyrime).

Po smūgio į priekinę plokštelę, dalelės kinetinė energija sumažėjo iki 1.74×10^{10} J, po smūgio į galinę plokštelę sumažėjo iki 0.47×10^{10} J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės titano medžiagos kinetinė energija buvo 0.2×10^{10} J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 0.13×10^{10} J. Atitrūkusios nuo priekinės plokštelės aliuminio medžiagos kinetinė energija buvo 0.15×10^{10} J prieš smūgi į galinę plokštelę, po smūgio sumažėjo iki 0.06×10^{10} J. Galinei plokštei priduta visa energija 0.1×10^{10} J (iš kurios 0.09×10^{10} J yra vidinė energija). Dalelė prarado 2.36×10^{10} J po smūgio į skydą.

²⁴ Šiuo atveju, likęs skydo storis buvo ~ 1.7 mm, matuojant nuo kraterio giliausio taško iki paskutinio, nepatyrusio spaliacijos, medžiagos elemento. Tokiu būdu, įtrūkimo gylis yra 57.5 % nuo viso storio.



24 pav. Tyrimų 9-90 efektyviausių skydų galinės plokštelės vaizdai

Mažiausią efektyvumo prieaugį parodė atstumo koregavimas: galinėje plokštelėje susiformavo pilna perforacija, jos skersmuo yra 6.4 mm. Be to, plokštelė taip pat patyrė spaliaciją. 30 mm atstumo padidinimas yra nepakankamas dalelių debesėliui išsiskleisti - debesėlio greitis po smūgio vis dar išlieka didelis. Užfiksuoti energijos ir įtrūkimų faktoriai pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Tyrimų 9-90 efektyviausių skydų energijų ir įtrūkimų faktoriai

Tyrimas:	Energijos vertės:		Normalizuotos energijos vertės:		Galinės plokštelės įtrūkimai:	
	$Ek_{d\ loss}$	$Etot_{gp}$	$\Delta Ek_{dp\ loss}$	$\Delta Etot_{gp}$	$d_d / \Delta d_d$:	$d_h / \Delta d_h$:
01	1.1×10^{10} J	0.48×10^{10}	1	1	24.8 mm / 1	4 mm / 0 %
02	3.98×10^{10} J	0.08×10^{10}	3.66	0.166	1.4 mm / 0.05	2 mm / 50 %
04	2.4×10^{10}	0.16×10^{10}	2.18	0.33	1.1 mm / 0.04	2.4 mm / 40 %
05	2.36×10^{10}	0.1×10^{10}	2.14	0.20	0.7 mm / 0.03	4 mm / 0 %

3.5. Tyrimų išvados

Tarpinės plokštelės skydas parodė aukščiausią efektyvumo prieaugį visuose tyrimuose. Tarpinė plokštelė veiksmingai absorbavo dalelių debesėlio kinetinę energiją, ir sumažino priduodamą galinei

plokštei energiją 99, 92 ir 83 %, lyginant su baziniu skydu²⁵. Tarpinės plokštelės implementavimas sumažino galinės plokštelės įtrūkimus iki nepaveiktos plokštelės ir dalinės perforacijos tyrimuose 3-35 ir 6-70 atitinkamai, palyginus su dalinę ir pilną perforaciją ekvivalentiniuose bazinio skydo tyrimuose. Tyrime 9-90, tarpinės plokštelės skydas sumažino bazinio skydo galinės plokštelės pilną perforaciją iki dalinės, 2.0 mm gylio (t.y. liko 50 % plokštelės storio po smūgio). Visuose tyrimuose tarpinė plokštelė patyrė kritinius įtrūkimus, ir laikoma visiškai suirusi 6-70 ir 9-90 tyrimuose. Padidinus atstumą tarp priekinės ir tarpinės plokštelių nuo 35 iki 60 mm, žymiai sumažėjo žala tarpinei ir galinei plokštelėms: galinės plokštelės įtrūkimas buvo sumažintas iki nekritinio minimalaus, tarpinės plokštelės pilnos perforacijos skersmuo buvo sumažintas 45% (nuo 24.4 iki 13.4 mm).

Antras efektyviausias skydo patobulinimas yra struktūros koregavimas. Koreguotos struktūros skydas sumažino pridodamą galinei plokštei energiją 90, 91 ir 67 % lyginant su baziniu skydu²⁶. Tyrimai atskleidė, jog koreguotos struktūros plokštei būdingi dideli įtrūkimai – tokios struktūros priekinė plokštelė suiro visuose tyrimuose²⁷. Koreguotos struktūros skydas pasižymi „kanalo“ efektu, kai skydo struktūra įtakuoja dalelio debesėlio tolimesnę formą (žr. 9 priedą). Papildomas koreguotos struktūros skydo tyrimas 6-70:04 atskleidė, jog padidinus cilindro išpjovimų ilgį nuo 5 iki 12 mm, padidintas skydo efektyvumas: dalinės perforacijos gylis ir skersmuo buvo sumažinti 42 ir 57 %, be to, tokio skydo galinė plokštelė nepatyrė spaliacijos. Koreguotos struktūros tyrimuose 3-35 ir 6-70 galinės plokštelės įtrūkimų gylis sudarė 5 ir ~23 % nuo viso plokštelės storio, tuo tarpu, tyrime 9-90 dalinės perforacijos gylis sudarė 60 % nuo viso plokštelės storio. Tyrime 9-90, pagrindinio įtrūkimo skersmuo buvo sumažintas 96 %, paliginus su bazinio skydo ekvivalentu.

Trečias efektyviausias būdas sumažinti galinės plokštelės žalą yra atstumo ir medžiagos koregavimai. Koreguoto atstumo skydas parodė puikų efektyvumo prieaugį tyrime 6-70, kur galinė plokštelė patyrė tik minimalius įtrūkimus, palyginus su bazinio skydo pilna perforacija. Toks skydas sumažino pridodamą galinei plokštei energiją 67 %. Padidintas atstumas paskatino didesnę dalelių debesėlio išsiskleidimą prieš jam smūgiuojant į galinę plokštelę.

Iš kitos pusės, toks skydas nesumažino galinės plokštelės pilnos perforacijos tyrime 9-90, bet sumažino jos skersmenį nuo 24.8 iki 6.4 mm. Tuo tarpu, koreguotos medžiagos skydas sumažino galinės plokštelės pilnos perforacijos skersmenį daugiau, nuo 24.8 iki 4.8 mm, Plokštelė vis tiek patyrė kritinį įtrūkimą, bet jis mažesnis už pakoreguoto atstumo ir bazinio skydo ekvivalentus. Pakoreguotos medžiagos skydas sumažino pridodamą galinei plokštei energiją 80 % tyrime 9-90. Kadangi koreguoto atstumo skydas tyrime 6-70 sumažino įtrūkimus žymiai daugiau nei koreguotos medžiagos tyrime 9-90, koreguoto atstumo skydas laikomas tikroju trečiu aukščiausiu efektyvumo prieaugiu.

Pabrėžiama, jog visi patobulinimai/koregavimai padidino bazinio skydo efektyvumą. 13 lentelėje pateikiami visų skydų efektyvumo kriterijai, ir jų efektyvumo prieaugio lygiai (tyrime 6-70, tarpinės plokštelės ir koreguotos struktūros skydams rezultatams naudojami jų papildomi tyrimai).

²⁵ Šiuo atveju kalbama apie 6-70:02 papildomą tyrimą.

²⁶ Šiuo atveju kalbama apie 6-70:04 papildomą tyrimą.

²⁷ Tyrime 3-35:04 priekinė plokštelė nesuiro, bet patyrė pakankamai didelę žalą tam, kad laikyti tokį skydą žlugusiu.

13 lentelė. Galutinis patobulintų skydų efektyvumo rezultatų palyginimas

Efektyvumo prieaugio lygis:	Aukščiausias prieaugis	Aukštas prieaugis	Vidutinis prieaugis	Bazinis arba nežymus prieaugis
Patobulinimai:	Tyrimas:			
	3-35	6-70	9-90	
Bazinis skydas 01	Dalinė perforacija 3.8 mm – 1.2 mm Spaliacija	Pilna perforacija 1.4 mm – 4.0 mm Spaliacija	Pilna perforacija 24.8 mm – 4.0 mm Spaliacija	
Tarpinė plokštelė 02	Plokštelė nepaveikta Nekritinis įtrūkimas	Minimalūs įtrūkimai Nekritinis įtrūkimas	Dalinė perforacija 1.4 mm – 2.0 mm Nekritinis įtrūkimas	
Storio koregavimas 03	Dalinė perforacija 3.0 mm – 0.3 mm Nekritinis įtrūkimas	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.9 mm Spaliacija	Pilna perforacija 2.0 mm – 4.0 mm Spaliacija	
Struktūros koregavimas 04	Minimalūs įtrūkimai Nekritinis įtrūkimas	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.9 mm Nekritinis įtrūkimas	Dalinė perforacija 2.0 mm – 2.1 mm Spaliacija	
Medžiagos koregavimas 05	Dalinė perforacija 4.6 mm – 0.7 mm Nekritinis įtrūkimas	Dalinė perforacija 1.2 mm – 0.3 mm Spaliacija	Pilna perforacija 0.7 mm – 4.0 mm Spaliacija	
Atstumo koregavimas 06	Dalinė perforacija 3.4 mm – 0.6 mm Spaliacija	Minimalūs įtrūkimai Nekritinis įtrūkimas	Pilna perforacija 6.4 mm – 4.0 mm Spaliacija	

3.6. Kombinuotų patobulinimų skydas

Siekiant sukurti skydą, kuris būtų efektyvus prie visų greičių ir dalelių dydžių, ir kuris patirtų kuo mažesnę žalą po smūgio, į vieną skydo struktūrą kombinuojami tarpinės plokštelės, struktūros, storio atstumo ir medžiagos koregavimo patobulinimai. Tokiu būdu siekiama implementuoti vieną ar kitą patobulinimą tokiu būdu, kad jus sumažintų kito patobulinimo trūkumus (t.y. būdingas tam patobulinimui įtrūkimų/žalos ypatybes). Taip, pavyzdžiui, tarpinės plokštelės tyrimų rezultatai atskleidė, jog tarpinei plokštei būdingas suirimas ir kritiniai įtrūkimai prie visų sąlygų. Siekiant sumažinti tokius įtrūkimus, tarpinei plokštei pridudama cilindro išpjovimų užpildo forma, kombinuojanti struktūros ir storio koregavimus. Tokia plokštelę sudaro cilindro išpjovimai (4 mm), sujungiantys priekinę (2 mm) ir galinę (2 mm) atramines sekcijas. Kombinuotų patobulinimų skydo struktūrą sudaro (žr. 25 pav.):

1. Priekinė plokštelė - priekinė sekcija 0.7 mm Ti-6Al-4V, galinė sekcija 0.7 mm Al 7075-T6;
2. 80 mm atstumu nuo priekinės plokštelės, tarpinės plokštelės priekinė sekcija 2 mm storio;
3. Tarpinės plokštelės cilindro išpjovimų formos užpildas 1 mm storio ir 4 mm ilgio cilindrai;
4. Tarpinės plokštelės galinė sekcija 2 mm storio. Tarpinė plokštelė yra Al 7075-T6;

5. 100 mm atstumu nuo priekinės plokštelės, galinė plokštelė 4 mm Al 7075-T6.

Priekinė 1.4 mm storio plokštelė skirta dalelei fragmentuoti. Implementuojamas medžiagos ir storio koregavimas: tokia priekine plokšte siekiama sugerti kuo daugiau dalelės kinetinės energijos smūgyje prie 9-90 sąlygų (kur medžiagos koregavimo tyrimas parodė gerą įtrūkimo skersmens sumažinimą). Tam, kad sumažinti titano debesėlio smūgiui būdinga spaliacijos fenomeną prie kitų greičių, sekcijų storis sumažinamas iki 0.7 mm - tokiu būdu mažiau titano fragmentų susiformuos į dalelių debesėlį. Siekiant sumažinti priekinės plokštelės įtrūkimus, titano ir aliuminio sekcijos privirinamos, ir sudaro vieną kūną - tarp sekcijų nėra atstumo.

Tarpinės plokštelės priekinė 2 mm storio sekcija skirta sugerti kuo daugiau dalelių debesėlio energijos, bet jos perforacija yra tikėtina. Cilindrų formos užpildas naudojamas kaip papildoma atraminė struktūra, priduodanti standumą priekiniai tarpinės plokštelės sekcijai. Taip pat tikėtina, kad cilindrų užpildas priduos „kanalo“ efektą debesėliui. Galinė sekcija yra atraminė sekcija cilindrų formos užpildui. Sprendžiant iš patobulintų skydų tyrimų, cilindrų formos užpildo išplovimams būdingas suirimas. Tam, kad išvengti to, išplovimų storis padidinamas nuo 0.5 iki 1 mm, ilgis sumažinamas iki 4 mm, atstumas tarp išplovimų yra 1 mm. Naudojamas padidintas atstumas tarp priekinės ir tarpinės, ir priekinės ir galinės plokštelių, siekiant leisti dalelių debesėliui išsiskleisti kuo daugiau. Kombinuotų patobulinimų skydo masės prieaugis nenagrinėjamas (žr. 12 priedą).

Eksperimentiniam tyrimui, tarpinę plokštelę galima pagaminti iš dviejų dalių: priekinė sekcija yra atskira dalis nuo užpildo ir galinės sekcijos (užpildas ir galinė sekcija yra vienas kūnas, pagamintas liejimu). Priekinė sekcija pritvirtinama prie atraminės sekcijos varžtais (galimas ir šaltas suvirinimas). Kaip ir pakoreguotos medžiagos skydo atveju, tokia plokštelė nelaikoma dviem atskiromis plokštelėmis, kadangi ji yra vientisos struktūros ir įfiksuojama viename taške erdvėlaivio atraminėje struktūroje.

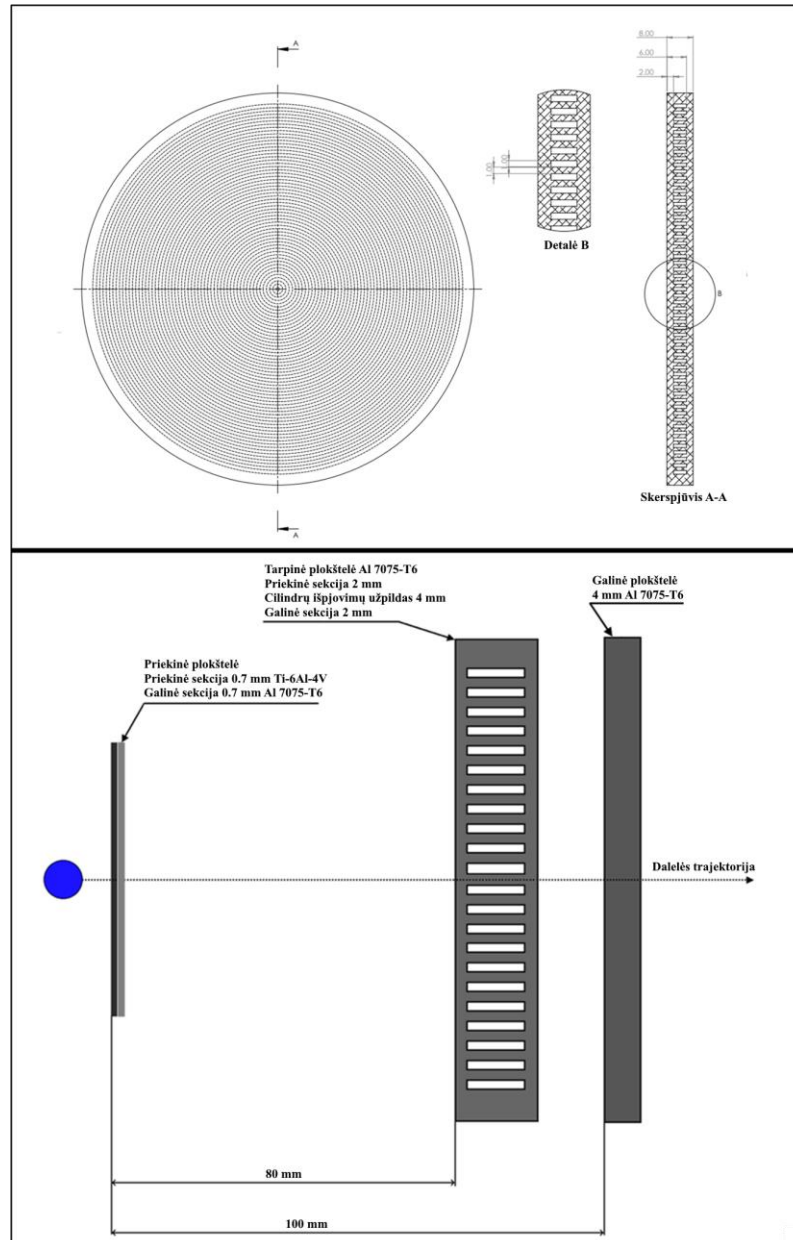
3.6.1. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai

Tyrimams suteikiamas numeris 07, rezultatai pateikiami 14 lentelėje (tyrimų vaizdai ir kūnų energijos grafikai pateikiami 13 priede), kombinuotų patobulinimų skydo schema parodyta 25 paveikslėlyje. Smūgiai atliekami į cilindrų išplovimo centrą (žr. 13 priedą). Priekinės plokštelės įtrūkimai matuojami bendrai abiem sekcijoms.

14 lentelė. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimų rezultatai

Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:			
	Priekinės plokštelės įtrūkimas d_d :	Tarpinės. plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
3-35:07	Pilna perforacija 5.1 mm	Dalinė perforacija 2.0 mm – 0.9 mm	Plokštelė nepaveikta	Tarpinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Plokštelės centras pasislinko ~ 1.5 mm trajektorijos link. Nekritinis įtrūkimas
6-70:07	Pilna perforacija 13.0 mm	Dalinė perforacija 1.2 mm – 0.6 mm	Plokštelė nepaveikta	Tarpinė plokštelė: krateriai plokštelės centre. Cilindro išplovimas centre patyrė spaliacija, bet plokštelė

				neprarado vientisumo, nekritinis įtrūkimas.
9-90:07	Pilna perforacija 18.4 mm	Dalinė perforacija 2.8 mm – 5.9 mm	Plokštelė nepaveikta	Tarpinė plokštelė: krateriai plokštelės centre. Plokštelės centras pasislinko ~11 mm trajektorijos link. Didelis medžiagos vientisumo praradimas – kritinis įtrūkimas

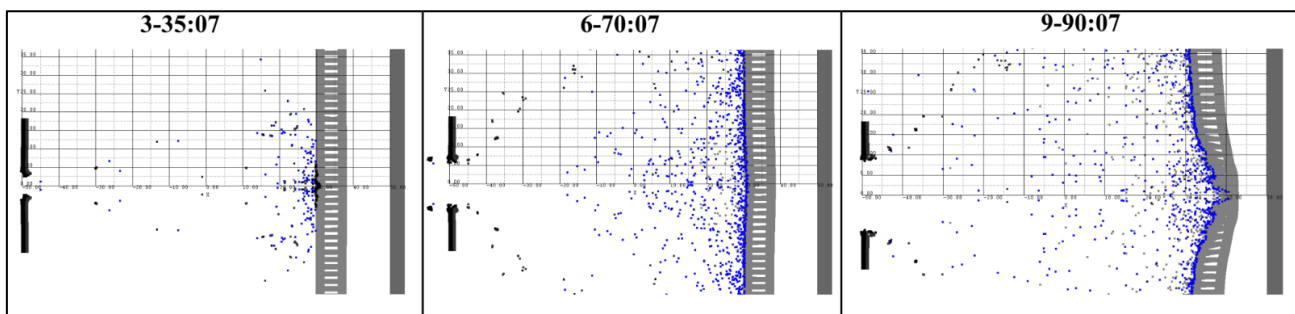


25 pav. Kombinuotų patobulinimų skydo brėžinys ir schema

Kombinuotų patobulinimų skydas parodė labai aukštą efektyvumą visuose tyrimuose: galinė plokštelė nebuvo paveikta nei viename tyrime. Be to, tyrime 3-35 ir 6-70, tarpinė plokštelė patyrė nekritinius įtrūkimus, ir gali būti naudojama toliau. Tyrime 9-90 tarpinė plokštelė patyrė labai didelę dalinę perforaciją – tolimesnis tokios plokštelės naudojimas būtų neoptimalus (žr. 26 pav.).

Patobulinta priekinė plokštelė patyrė didesnius įtrūkimus nei bazinio skydo, bet sekcijos nepatyrė būdingą pasislinkimą nuo bendros vertikalės.

Kombinuotų patobulinimų skydo tarpinė plokštelė taip pat gali būti naudojama kaip priekinė plokštelė. Be to, buvo atlikti smūgiai į tarpinės plokštelės cilindrus išpjovimų akute, tai yra, į vietas, tarp cilindrus išpjovimų (žr. 14 priedą). Tokie smūgiai parodė skirtingą dalelių debesėlio formavimą, dėl skirtingų cilindrus užpildo konstrukcinių parametrų (cilindrus išpjovimų storis, ilgis, skaičius, t.t.) - tai pagrindžia tolimesnį tokio skydo optimizavimą ir tyrimus.



26 pav. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimų vaizdai

Išvados

1. Ištirta literatūra atskleidė, kad didėjant šiukšlėms Žemės orbitoje, erdvėlaivių ekranavimo technologijų poreikis išaugo. Efektyvus ekranavimas reikalingas apsaugoti erdvėlaivius nuo susidūrimų su kosminėmis šiukšlėmis, tuo pačiu laiku nekompromituojant erdvėlaivio konstrukcijos. Whipple skydai atlieka tokį ekranavimą, ypač efektyviai prieš mažesnes daleles, kurias neįmanoma išvengti erdvėlaivio manevrais. Šiukšlių smūgio metu, pabrėžiami skirtingi fiziniai reiškiniai: dalelės suirimas į fragmentų debesėlį, jo tolimesnis formavimas, Whipple skydų įtrūkimų formavimas ir patirta erdvėlaivio korpuso žala. Smūgių reiškiniai galima įtakoti, koreguojant (tobulinant) skydų struktūrinės savybes. Tokie koregavimai nutaikyti į didesni dalelių fragmentavimą, didesnę kinetinės energijos praradimą, palankesnės formos pridavimą debesėliui. Šiuolaikiniai eksperimentiniai ir skaitiniai skydų tyrimai atskleidžia, kaip skydų patobulinimai skirtingai įtakoja skydo efektyvumą. Taip, pavyzdžiui, N-formos ir „kiaušinių dėžutės“ formos skydai priduoja dalelių debesėliui palankesnę formą ir skatina jo išsiskleidimą, adatos formos skydas parodo lygų ekvivalentinio storio, vienos-plokštelės skydai efektyvumą, bet sveria 3-4 kartus mažiau. Be to, šio skydo išradėjai siūlo tolimesnius tokio skydo medžiaginius patobulinimus. Titano lydinio medžiagos savybės teigiamai įtakoja dalelės makro-mechaninę struktūrą smūgio metu. Dvigubos medžiagos skydo tyrimai parodo geresnę efektyvumą už ekvivalentinio storio, vientisos aliuminio plokštelės skydo konstrukciją - tyrimo autoriai atskleidė, jog medienos ir aerogelio deriniai su aliuminiu yra ypač efektyvūs. Visi paminėti patobulinimai buvo atskleisti skirtinguose tyrimuose – tai skatina tokių struktūrinių patobulinimų kombinavimą, siekiant sukurti aukšto efektyvumo skydą. Optimalus kombinavimas pasiekiamas, implementuojant vieno patobulinimo pranašumą, kito trūkumui sumažinti.
2. Sukurti du aukšto greičio (hiper-greičio) dalelės smūgio į skydą skaitiniai verifikacijos modeliai, imituojantys eksperimentinius tyrimus. Pirmas verifikacijos modelis parodė gerą sutapimą su eksperimentinio tyrimo rezultatais: po smūgio skydo plokštelėje susiformavo 17.2 mm skersmens įtrūkimas. Lyginant su eksperimentinio tyrimo 16.508 mm, tai yra maždaug 4 % skirtumas. Skaitinio modelio įtrūkimo vieta parodė vidutinį sutapimą su eksperimento ekvivalentu: verifikacijos modelio įtrūkimo vieta turi daugiau suapvalintą formą, galimai dėl erozijos modelio paklaidos. Susiformavusio dalelių debesėlio matmenis parodė labai aukštą koreliaciją su eksperimentinio tyrimo rezultatais: didžiausias skirtumas sudarė 1.5 %. Be to, debesėlio regionai su skirtingomis dalelių koncentracijomis sutampa su eksperimento radiografinėmis nuotraukomis. Antras verifikacijos modelis atskleidė, jog skaitinės dalelės deformacija ir irimas, nors didesnė, bet sutampa su eksperimento rezultatais. Verifikacijos modelis patvirtino darbe naudojamų medžiagos modelių ir modeliavimo metodų tikslumą ir atitinkamumą realiems tyrimams.
3. Iš atliktų bazinio efektyvumo tyrimų pasirinkti trijų tyrimų sąlygos 3-35, 6-70 ir 9-90, tolimesniam taikymui patobulintų skydų tyrimuose. Užfiksuojami priekinės ir galinės plokštelių įtrūkimai parodė, jog bazinis 1 mm storio skydas negali efektyviai apsaugoti galinę plokštelę – visuose tyrimuose galinė plokštelė patyrė kritinius įtrūkimus. Baziniam skydai buvo pritaikyti penki struktūriniai patobulinimai: tarpinės plokštelės, koreguoto storio, struktūros, medžiagos ir atstumo. Patobulinimai pagrįsti padidinta smūgiuojančios dalelės kinetinės energijos absorbcija, ir padidintu dalelių debesėlio išsiskleidimu. Šių patobulinimų rezultatai parodė, jog tarpinės plokštelės implementavimas yra geriausias būdas sumažinti galinės plokštelės įtrūkimus prie visų tyrimų sąlygų. Lyginant su baziniu skydu, tarpinės plokštelės skydas sumažino pridudamą

galinei plokštei energiją 99, 92 ir 83 % prie 3-35, 6-70 ir 9-90 sąlygų atitinkamai. Visuose tyrimuose kritiniai įtrūkimai buvo sumažinti iki nekritinių. Atskleista, kad antras geriausias būdas patobulinti skydo efektyvumą yra priekinės plokštelės struktūros koregavimas. Toks skydas įtakuoja dalelės debesėlio formavimą ir tolimesnį išsiskleidimą. Lyginant su baziniu skydu, koreguotos struktūros skydas sumažino pridodamą galinei plokštei energiją 90, 91 ir 67 % prie 3-35, 6-70 ir 9-90 sąlygų atitinkamai. Išskyrus tyrimą 9-90, kritiniai įtrūkimai buvo sumažinti iki nekritinių. Atstumo ir medžiagos koregavimai laikomi trečiu geriausiu patobulinimu: atstumo koregavimas tyrimą 6-70 sumažino pilną perforaciją iki minimalių įtrūkimų, o medžiagos koregavimas sumažino pilnos perforacijos skersmuo tyrimą 9-90. Atstumo koregavimas laikomas tikruoju trečiu geriausiu patobulinimu.

4. Siekiant sukurti aukščiausio efektyvumo skydą, visi ištirti patobulinimai kombinuojami į vieną skydą. Tokį skydą sudaro priekinė, 1.4 mm storio plokštelė, kurios priekinė ir galinė sekcijos yra Ti-6Al-4V ir Al 7075-T6 atitinkamai, ir tarpinė cilindrių išpjovimų formos užpildo plokštelė, uždėta 80 mm nuo priekinės. Tarpinė plokštelė yra dviejų atraminių sekcijų struktūra, tarp sekcijų taikomas cilindrių išpjovimų formos užpildas. Sukurtas skydas implementuoja ištirtus patobulinius taip, kad sumažinti kiekvieno patobulinimo trūkumus. Toks skydas parodė puikius rezultatus visuose tyrimuose: dalelių debesėliai buvo sėkmingai sustabdyti prieš pasiekiant galinę plokštelę. Tyrimuose 3-35 ir 6-70 tarpinė plokštelė nepatyrė kritinių įtrūkimų, bet tyrimą 9-90, plokštelė patyrė didelę dalinę perforaciją – plokštelės tolimesnis naudojimas būtų neefektyvus. Skydo konstrukciniai parametrai pagrindžia tolimesnį tokio skydo optimizavimą ir tyrimus.

Rekomendacijos

Atlikto darbo rezultatai parodo kaip skirtingi skydo struktūrinių savybių patobulinimai padidina jo efektyvumą ekranuojant nuo hiper-greičiu smūgiuojančių dalelių. Darbe buvo siekiama kuo tiksliau atlikti skydų tyrimus prie skirtingų dalelių greičių, dydžių ir skydų struktūrų. Galimas keletas būdų padidinti tolimesnių darbų, nutaikytų į pažangesnių skydų struktūras, tikslumą:

Skaitinis metodas: kaip parodė verifikacijos modelis, SPH metodas yra optimalus pasirinkimas dalelėms ir skydai modeliuoti, bet reikalauja gerų kompiuterinių išteklių modeliui atlikti per adekvatų laikotarpį. Darbe modeliams buvo suteikti vidutinio dydžio elementai, siekiant iširti daug modelių prie skirtingų sąlygų per nuplanuotą laikotarpį. Tolimesniems tyrimams rekomenduojama naudoti mažesnių elementų dydį (t.y. naudoti daugiau elementų). Mažesnius elementus verta taikyti tyrinėjant specializuotus skydus, t.y. vieną skydo struktūrą prie vieno ar dviejų tyrimų sąlygų (dalelės greičio, dydžio), kadangi atlikti tokį modelį prireiks labai daug laiko. Gauti rezultatai bus tikslesni ir daugiau atitiks eksperimentinių tyrimų rezultatams. Taip pat galimas SPH faktorių – sąveikavimo regiono arba išlyginimo funkcijos - koregavimas. Toks koregavimas reikalauja eksperimentiškai, per keletą modelių, nustatyti kokius SPH faktoriai tinka geriausiai.

Dar vienas būdas patobulinti modelio tikslumą yra adaptyvus SPH metodo implementavimas [21]. Tokiame metode kūnams suteikiamas baigtinių elementų modelis (pvz. lagranžinis). Smūgio metu, suirę elementai paverčiami į SPH elementus. Toks metodas parodo gerą „pavojingumą“ (didelių ir greitų) dalelių debesėlio fragmentų atvaizdavimą, kadangi, jiems nesuirus išlieka baigtinio elementų struktūra, kurią lengviau studijuoti. Toks metodas reikalauja labai geru kompiuterinių išteklių ir sprendiklio (angl. *solver*) korekcijų.

Medžiagos modeliai: darbe panaudoti standartiniai, dažnai pasitaikantys literatūroje, medžiagos modeliai, kurie parodė gerą tikslumą verifikacijos modelyje. Aktualioje literatūroje taip pat galima rasti kitų modelių, taip, pavyzdžiui, AUTODYN bibliotekoje yra taip vadinamas Tillotson modelis, kuris apskaičiuoja medžiagos agregatinės būsenos virsmą. Toks modelis gali parodyti tikslesnius dalelių debesėlio reiškinius nei naudojamas šitame darbe Shock EOS.

Tam, kad nustatyti kokius EOS, plastiškumo, irimo ir erozijos modeliai tiksliausiai atvaizduoja medžiagos atsakas, reikalingi eksperimentiniai skydų tyrimai. Tokių tyrimų metu būtų fiksuojami skirtingi reiškiniai, pavyzdžiui, dalelės irimas, debesėlio formavimas, jo regionai, t.t.

Eksperimentiniai tyrimai: skaitiniuose tyrimuose modeliai sugeba pakankamai tiksliai imituoti medžiagų atsakas smūgio metu, bet tokiems tyrimams būdingos paklaidos: medžiagos modelių netikslumas, skaitinių metodų nefiziniai reiškiniai, naudotojo įvedami neteisingi parametrai, ir pan. Tokie eksperimentai yra tiksliausias būdas tyrinėti Whipple skydus. Rekomenduojama tolimesnius skaitinius tyrimus atlikti kartu su eksperimentiniais, remiantis galimybe pagaminti skydą ir iširti jo efektyvumą mokslinėje/techninėje įstaigoje, kur yra specializuota įranga tokiems tyrimams atlikti.

Kitos rekomendacijos: atlikti tyrimus prie kitų greičių - pasirinkti darbui greičiai atitinka trims BLE regionų riboms, bet taip pat verta iširti smūgius regionų viduriuose (žr. 5 pav.). Iširti kitas medžiagas, turinčias gerus efektyvumo potencialus, pavyzdžiui aliuminio oksido, kompozitinių medžiagų, trigubos medžiagos derinius. Be to, rekomenduojamas tolimesnis šito darbo kombinuotų patobulinimų skydo struktūrinių savybių optimizavimas: skydas parodė gerus rezultatus prie visų

tyrimų sąlygų, bet susiformavę jame įtrūkimai tyrime 9-90 pagrindžia tolimesnius patobulinimus. Sprendžiant iš patirtos žalos (žr. 13 priedą), tokiam skydui būdingi priekinės ir galinės sekcijų įtrūkimai – tolimesnis optimizavimas gali būti nutaikytas į sekcijų standumo patobulinimą, pavyzdžiui: kitos formos užpildas, užpildo cilindro konstrukcinių parametrų koregavimas, kitų medžiagų implementavimas, kitos priekinės plokštelės naudojimas.

Literatūros sąrašas

1. GUPTA, Y., et al. Active and passive protection of low earth orbit satellites from space environmental effects. In 66th International Astronautical Congress 2015: Space - The Gateway for Mankind's Future, IAC 2015. Jerusalem: International Astronautical Federation, 2015, pp 1-10
2. MESPOULET, J., et al. Experimental study of hypervelocity impacts on space shields above 8 km/s. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2017, vol. 204, 508-515 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.748
3. WEN, K., CHEN, X., LU, Y. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview. *Defence Technology* [interaktyvus]. KeAi Publishing. 2021, vol. 17(6), 1864-1886 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.dt.2020.11.005
4. PAI, A., et al. Advances in the Whipple Shield Design and Development. *Journal of Dynamic Behavior of Materials* [interaktyvus]. Springer. 2021, vol. 8, 20 - 38 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1007/s40870-021-00314-7
5. ANZ-MEADOR, P. Orbital Debris Quarterly News. *NASA Orbital Debris Program Office (ODPO)* [interaktyvus]. 2021, vol. 25(1), 9-10 [žiūrėta 2022-19-12] Prieiga per: <https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i1.pdf>
6. KALINSKI, M. E. Hypervelocity impact analysis of International Space Station Whipple and Enhanced Stuffed Whipple Shields. *Monterey, California. Naval Postgraduate School* 2004
7. FLEGEL, S. K., et al. Future satellite failure risk due to hypervelocity impacts. In: *International Astronautical Federation - 59th International Astronautical Congress*. Glasgow: IAC, 2008, pp. 2281-2287.
8. PUTZAR, R., et al. A stuffed Whipple shield for the Chinese space station. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier. 2019, vol. 132, 103304 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.018
9. LIU, M., et al. Characterization of Damage in Shielding Structures of Space Vehicles Under Hypervelocity Impact. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier. 2017, vol. 188, 286-292 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.486
10. HAYASHIDA, K.B., ir ROBINSON, J.H. *Double-Plate Penetration Equations: Technical Memorandum* [interaktyvus] Marshall Space Flight Center, Alabama, 2000 [žiūrėta 2022-19-12] Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000032469>
11. WEN, X., et al. Shielding performance of debris shield with separated rear wall. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, March 2020, vol. 137, 103446 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103446
12. WEN, X., et al. Preliminary study on shielding performance of debris shield with the rear wall combining light materials and an aluminum plate. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, February 2019, vol. 124, 31-36 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.006
13. KAWAI, N., et al. Stress Wave and Damage Propagation in Transparent Materials Subjected to Hypervelocity Impact. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 103, 287-293 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2015.04.049
14. GONSHUN, G., et al. Crater distribution on the rear wall of AL-Whipple shield by hypervelocity impacts of AL-spheres. *International Journal of Impact Engineering*

- [interaktyvus]. Elsevier, December 2008, vol. 35(12), 1541-1546 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.028
15. WEN, K., et al. Analysis on the fragmentation pattern of sphere hypervelocity impacting on thin plate. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, December 2020, vol. 146, 103721 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103721
 16. ZHANG, P. L., et al. Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Al-nylon impedance-graded. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, vol. 124, 22-[žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.005
 17. HANADA, T. ir LIOU, J. C. Comparison of fragments created by low- and hyper-velocity impacts. *Advances in Space Research* [interaktyvus]. Elsevier, 2008, vol. 41(7), 1132 – 1137 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.asr.2007.05.062
 18. RYAN, S. ir CHRISTIANSEN, E. Hypervelocity impact performance of open cell foam core sandwich panel structures. Johnson Space Center, Houston 2009 [interaktyvus] pp. 705-716. [žiūrėta 2022-19-12] Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20090023410>
 19. DECONINCK, P., et al. Experimental and Numerical Study of Submillimeter-Sized Hypervelocity Impacts on Honeycomb Sandwich Structures. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2017, vol. 240, 452-459 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.740
 20. HOFMANN, D. C., et al. Hypervelocity Impact Testing of a Metallic Glass-Stuffed Whipple Shield. *Advanced Engineering Material* [interaktyvus]. Wiley, 2015, vol. 17(9), 1313-1322 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1002/adem.201400518
 21. HE, Q-G., CHEN, X. ir CHEN, J-F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud. *Acta Astronautica* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, vol. 175, 99-117. ISSN 0094-5765. [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.actaastro.2020.05.056
 22. MILLER, J. E., et al. Analytic Ballistic Performance Model of Whipple Shields. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 103, 389-397 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2015.04.037
 23. ZHANG, X-t., JIA, G-h. ir HUANG, H. A fast numerical approach for Whipple shield ballistic limit analysis. *Acta Astronautica* [interaktyvus]. Elsevier, 2014, vol. 93, 112-120 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.actaastro.2013.06.014
 24. REIMERDES, H.-G., NÖLKE, D. ir SCHÄFER, F. Modified Cour-Palais/Christiansen damage equations for double-wall structures. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2006, vol. 33(1-12), 645-654 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.036
 25. ZHANG, X., JIA, G. ir HUANG, H. An approach for constituting double/multi wall BLE by single wall BLE of spacecraft shield. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2014, vol. 69, 114 – 121 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.009
 26. WEN, X-z., et al. Debris dispersion effect in N-shape configuration. *Acta Astronautica* [interaktyvus] 2014, vol. 104(1) 173 – 178 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.actaastro.2014.06.037

27. LIU, P., LIU, Y. ir ZHANG, X. Simulation of hyper-velocity impact on double honeycomb. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 12, 241-254. [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1007/s10999-015-9300-7
28. LIU, P., LIU, Y. ir ZHANG, X, Improved shielding structure with double honeycomb cores for hyper-velocity impact. *Mechanics Research Communications* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 69, 34-39 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.mechrescom.2015.06.003
29. SILNIKOV, M., et al. Efficiency of needle structure at hypervelocity impact. *Acta Astronautica* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, vol. 150, 73-80 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.actaastro.2017.10.026
30. ZHANG, X., et al. Hypervelocity impact performance of aluminum egg-box panel enhanced Whipple shield. *Acta Astronautica* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 119, 48-59 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.actaastro.2015.10.013
31. CHRISTIANSEN, E. L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Pergamon Press Ltd 1993, vol.14(1-4), 145-156 [žiūrėta 2023-01-24] doi: 10.1016/0734-743x(93)90016-z
32. KIM, Y, et al. Behavior of dragon skin flexible metal bumper under hypervelocity impact. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, vol. 125, 13-26 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.005
33. IYER, K. A., et al. Hypervelocity Impact Response of Ti-6Al-4 V and Commercially Pure Titanium. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2013, vol. 58, 127 – 137 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.proeng.2013.05.016
34. WU, Q., et al. Potential space debris shield structure using impact-initiated energetic materials composed of polytetrafluoroethylene and aluminum. *Applied Physics Letters* [interaktyvus]. AIP Publishing, 2016, vol. 108, 101903. [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1063/1.4943584
35. REN, S., et al. A debris cloud model for hypervelocity impact of the spherical projectile on reactive material bumper composed of polytetrafluoroethylene and aluminum. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, vol. 130, 124-137 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.011
36. HUANG, X., et al. Hypervelocity impact of TiB₂-based composites as front bumpers for space shield applications. *Materials & Design* [interaktyvus] 2016, vol. 97, 473-482 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.126
37. ZHAO, S., SONG, Z. ir ESPINOSA, H. D. Modelling and analyses of fiber fabric and fabric-reinforced polymers under hypervelocity impact using smooth particle hydrodynamics. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, vol. 144, 103586 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103586
38. REN, S., et al. The hypervelocity impact resistance behaviors of NbC/Al₂O₃ ceramic-metal composites. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, vol. 148, 103759. [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103759
39. HUANG, X., et al. Amorphous alloy reinforced Whipple shield structure. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2011, vol. 42, 1-10 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2011.11.001
40. FAHRENTHOLD E., P. ir HORBAN B., A. An improved hybrid particle-element method for hypervelocity impact simulation. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus].

- Elsevier, 2001, vol. 26(1-10) 169-178 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/S0734-743X(01)00079-3
41. TAYLOR, E. A. Simulation of hollow shaped charge jet impacts onto aluminium Whipple bumpers at 11 km/s. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2001, vol. 26(1-10), 773-784 [žiūrėta 2022-19-12] doi: 10.1016/S0734-743X(01)00129-4
 42. SIGALOTTI, L. DI G., et al. The Mathematics of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Consistency. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics* [interaktyvus]. Frontiers in Applied Mathematics and Statistics, 2021, vol. 7 [žiūrėta 2023-24-01] doi: 10.3389/fams.2021.797455
 43. DONG, X.W., et al. A smoothed particle hydrodynamics (SPH) model for simulating surface erosion by impacts of foreign particles. *Tribology International* [interaktyvus]. Elsevier 2016, vol. 95, 267-278. [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.038
 44. HAYHURST, C., et al. Numerical Simulation of Hypervelocity Impacts on Aluminum and Nextel/Kevlar Whipple Shields. In *Hypervelocity Shielding Workshop: Galveston, Texas 1998*
 45. SON, B. J., YOO, J., ir LEE, M. Optimal design of a composite space shield based on numerical simulations. *Journal of Mechanical Science and Technology* [interaktyvus]. Springer, 2021, vol. 29(12), 5299-5308 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1007/s12206-015-1132-8
 46. BIRNBAM, N. K., et al. Numerical Simulation of Structural Deformation Under Shock and Impact Loads Using a Coupled Multi-Solver Approach. In *5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures 2004*
 47. PIERAZZO, E., ir COLLINS, G. A Brief Introduction to Hydrocode Modeling of Impact Cratering. *Cratering in Marine Environments and on Ice* [interaktyvus]. Springer, 2004, vol. 323-340 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1007/978-3-662-06423-8_16
 48. AKRAM, S. et al. Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminium (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach. *Advances in Mechanical Engineering* [interaktyvus]. Sage Publications, 2018, vol. 10(9), 1-14 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1177/1687814018797794
 49. BRAR, N. S., JOSHI, V.S., HARRIS, B. W. Constitutive Model Constants for Al7075-T651 and Al7075-T6. *Shock Compression of Condensed Matter 2009: Proceedings of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. AIP Conference Proceedings* [interaktyvus]. AIP Conference Proceedings, 2009, vol. 1195, 945-948 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1063/1.3295300
 50. CORBETT, B.M. Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2006, vol. 33 (1-12), 431 – 440 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086
 51. CENTURY DYNAMICS, INC., AUTODYN Explicit Software for Nonlinear Dynamics, Revision 4.3, Theory Manual [programinė įranga] 2005 [žiūrėta 2023-01-04]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/>
 52. FLORANDO, J. N., et al. Modeling the effect of laser heating on the strength and failure of 7075-T6 aluminum. *Materials Science and Engineering: A.* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 640, 402-407 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.msea.2015.05.105

53. PIEKUTOWSKI, A. J. Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impacts. In *NASA Contractor Report 4707*. University of Dayton Research Institute MSFC, Alabama 1996
54. LESUER, D. R., KAY, G.J., LEBLANC, M.M. Modeling Large-Strain, High-Rate Deformation in Metals. In *Third Biennial Tri-Laboratory Engineering Conference Modelling and Simulation, Pleasanton 1999*. 2001
55. LEE, S. ir HONG, J-W. Parametric studies on smoothed particle hydrodynamic simulations for accurate estimation of open surface flow force. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* [interaktyvus]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, vol. 12, 85-101 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.07.003
56. ZHANG, Y., OUTEIRO, J.C., MABROUKI, T. On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting. In *Procedia CIRP 31 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations* [interaktyvus]. Elsevier, 2015, vol. 31, 112-117 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.procir.2015.03.052
57. PIEKUTOWSKI, A. J. Fragmentation-Initiation Threshold for Spheres Impacting at Hypervelocity. *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2003, vol. 29(1-10), 563–574 [žiūrėta 2023-01-04] doi: 10.1016/j.ijimpeng.2003.10.005
58. GRADY, D., E. The spall strength of condensed matter. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [interaktyvus]. Elsevier. 1988, vol. 36(3), 353-384 [žiūrėta 2023-01-24] doi: 10.1016/0022-5096(88)90015-4

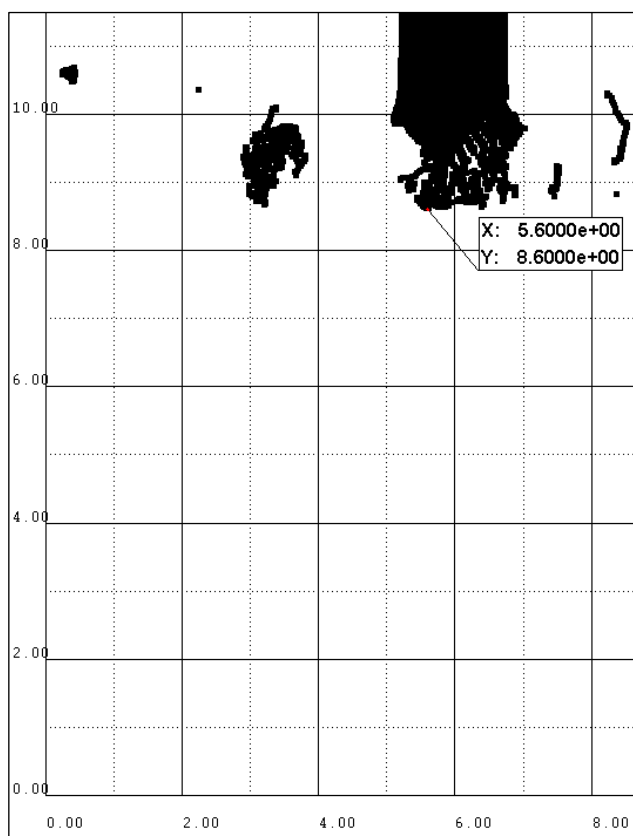
Priedai

1 priedas. Verifikacijos modelio plokštelės įtrūkimo matavimo metodas

Paveikslėlyje parodytas verifikacijos modelio įtrūkimo skersmens matavimas: pažymėtas neatitrūkęs nuo plokštelės (vientisos medžiagos terpei priklausantis) SPH elementas įtrūkimo viduje²⁸.

Verifikacijos modelyje skydo SPH elementams taikomas 0.05 mm dydis, dalelei – 0.1 mm. Galimos paklaidos dėl geometrinės erozijos. Modelis yra simetriškas apie X ašį (trajektorijos ašį). Matuojant nuo X-ašies, užfiksuojama tik pusė įtrūkimo matmens. Matmuo dauginamas iš 2, kad gauti visą įtrūkimo skersmenį. Toks matavimo būdas taikomas visame darbe.

Pabrėžiama, kad plokštelė uždėta koordinacių erdvėje taip, kad jos priekinis paviršius yra ties 5.0 mm X-ašies atžvilgiu (paveikslėlyje plokštelės centras pasislinko po smūgio). Štame modelyje, nulinė koordinatė buvo smūgiuojančios dalelės pusapskritimo centras.



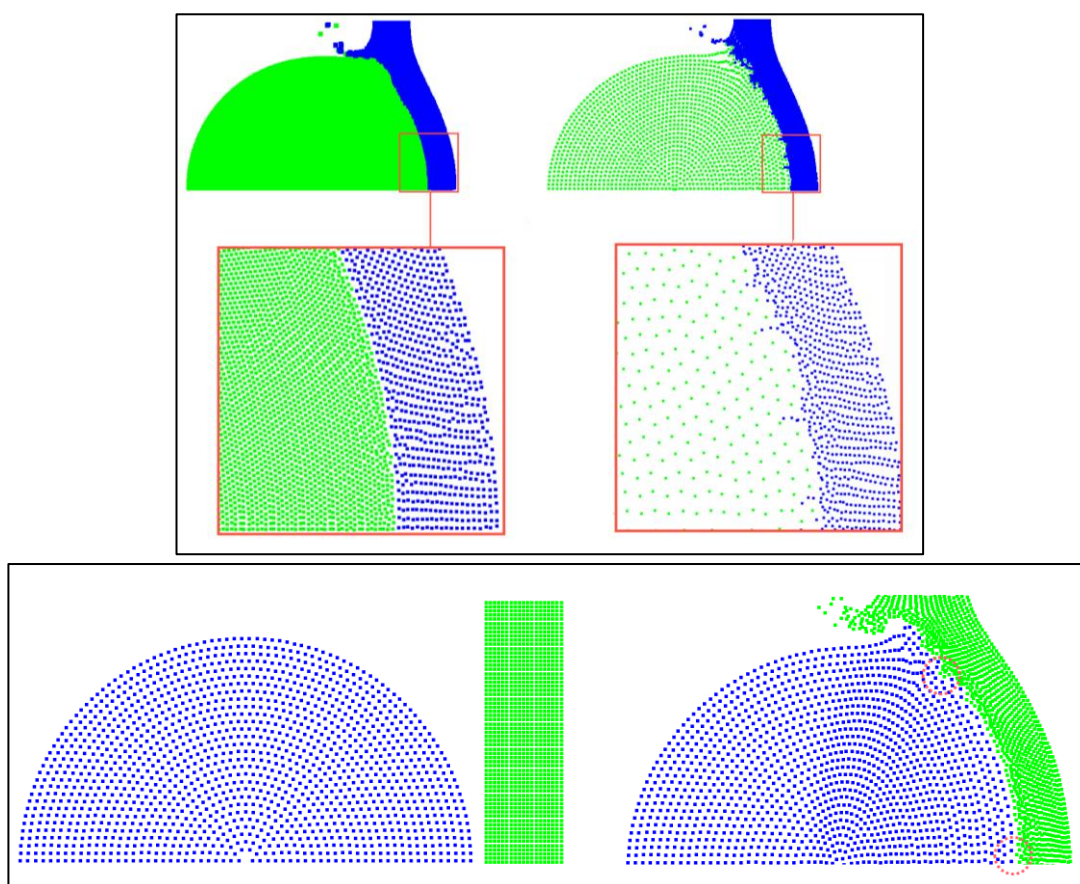
²⁸ Imituojamas matavimas slankmačiu.

2 priedas. Netinkamo SPH elementų skaičiaus paklaida

Pirmame paveikslėlyje parodyta, kaip netinkamas SPH elementų skaičius gali sukelti nefizinius medžiagos reiškinius smūgio metu: kairėje parodytas modelis, kur skydui taikomas SPH elementų dydis 0.05 mm, dalelei – 0.08 mm; dešinėje parodytas modelis, kur dalelei taikomas SPH elementų dydis 0.14 mm. Kai skirtumas tarp kūnų SPH elementų dydžių yra per didelis, kūnas, kurio SPH elementai mažesni, gali įsiskverbti į didesnių elementų kūną. Kairiame vaizde dalelės elementai juda kartu su plokštelės elementais, kadangi jų dydžiai yra atitinkami (t.y. panašūs); dešiniame vaizde, kai kurie plokštelės elementai įsiskverbia į skydo terpę, kadangi jie yra beveik trigubai mažesni. Toks reiškinys laikomas paklaida dėl skirtingų SPH elementų sąveikavimo regionų. Parodytas paveikslėlyje įsiskverbimas sukelia santykinai nedidelę paklaidą.

Antras paveikslėlis parodo šio darbo paklaidą (dalelėms mažiausiai 30 SPH elementų, plokštelėms – 15). Taikant tinkamus SPH elementų dydžius visiems kūnams galima išvengti tokios paklaidos, bet toks modelis sunaudos daugiau kompiuterinių išteklių. Kadangi dalelės yra sferos formos, o plokštelė stačiakampio, jos užpildamos elementais skirtingai. Dėl to leistinas nevisiškai identiško dydžio elementų naudojimas (tarp kūnų).

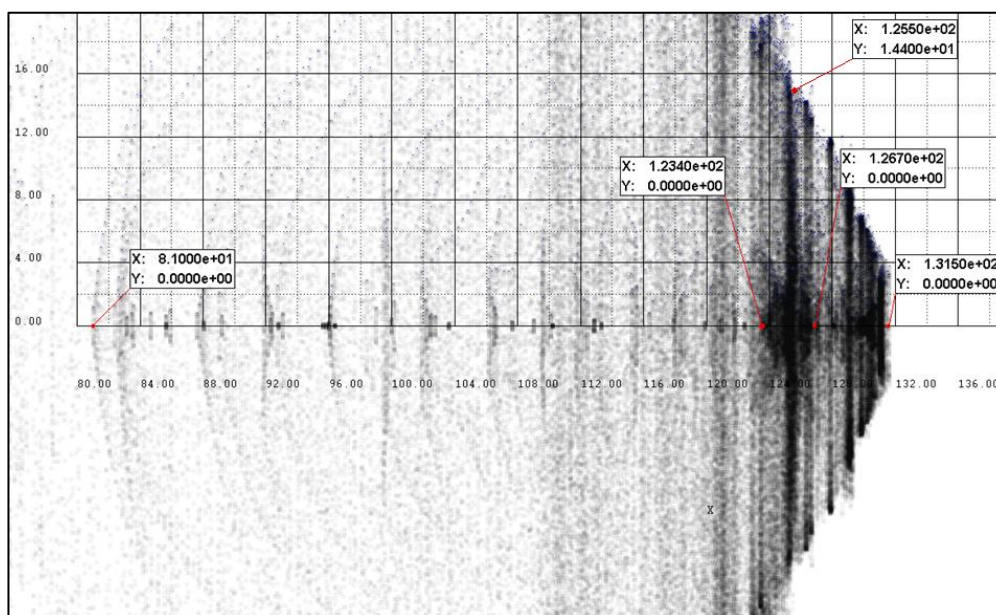
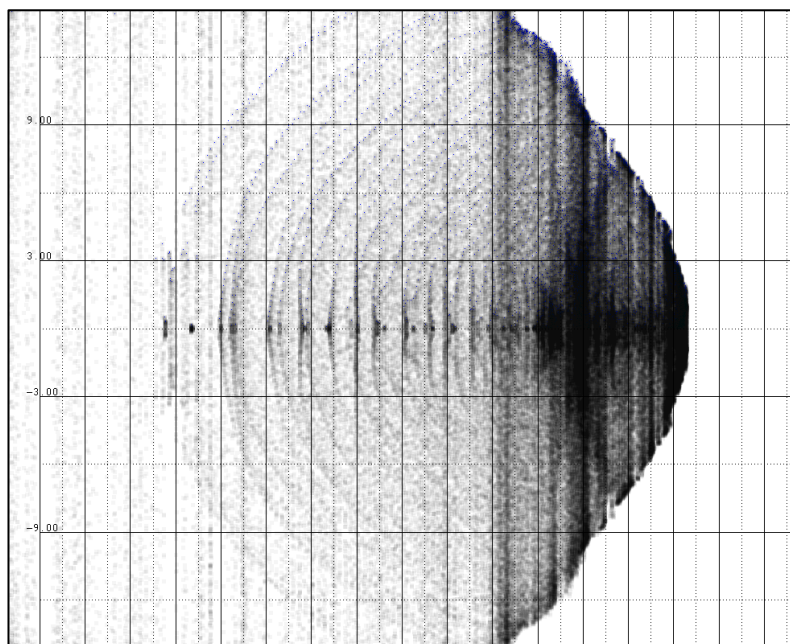
Darbe, tinkamas SPH elementų dydis nustatytas eksperimentiškai - buvo atlikti modeliai su skirtingais dalelių ir skydų elementų dydžiais, o kūnų elementų sąveikavimas smūgio metu buvo nagrinėjamas realiuoju laiku. Pasirinkti SPH elementų dydžiai pagrįsti visų pirma paminėtos paklaidos vengimu (t.y. tikslumu) ir antra – optimaliu kompiuterinių išteklių sunaudojimu (t.y. modelių atlikimu per adekvatų laikotarpį).



3 priedas. Verifikacijos modelio dalelių debesėlio vaizdai ir matmenis 7.2 ir 20.3 μs laikais.

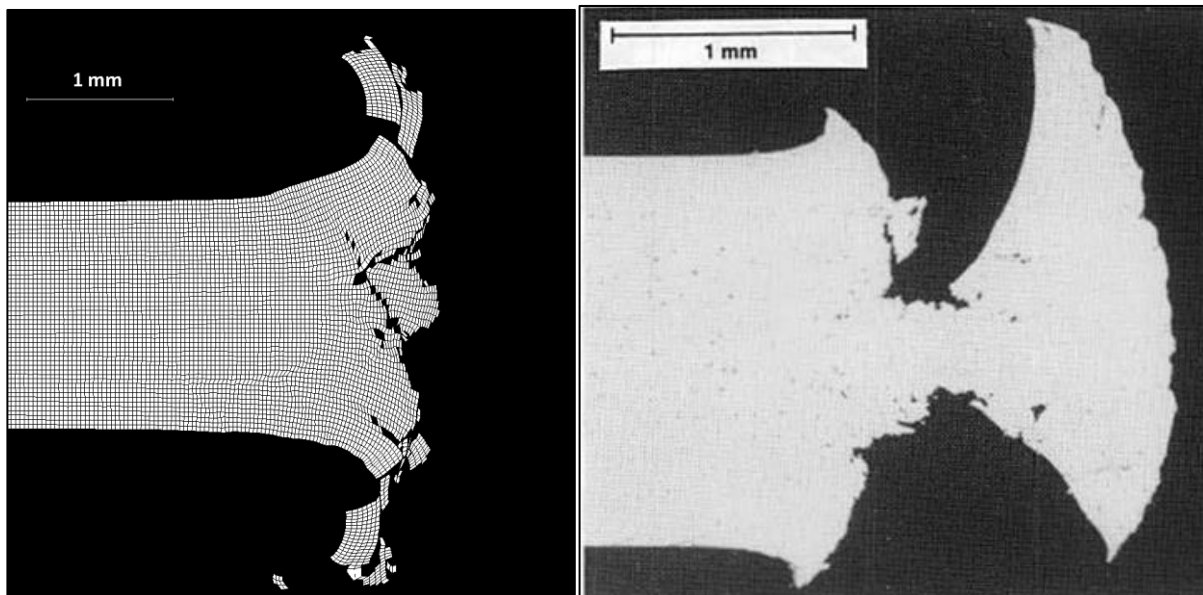
Paveikslėliuose parodyti dalelių debesėlio vaizdai 7.2 ir 20.3 μs laikais (po smūgio į plokštelės priekinį paviršių). Antrame paveikslėlyje taip pat parodyti debesėlio matavimo taškai, naudojami palyginti rezultatus su imituojamo eksperimento ekvivalentais.

Pabrėžiama, kad pagal eksperimentinį tyrimą, debesėlio matavimas atliekamas nuo plokštelės priekinio paviršiaus. Skaitiniame modelyje, iš užfiksuotų matavimų atimamas 5.0 mm skirtumas (žr. 1 priedą) tarp plokštelės priekinio paviršiaus ir tikrosios nulinės koordinatės (nuo kurios matuoja matavimo taškai). Patobulintų skydų tyrimuose nulinė koordinatė yra priekinės plokštelės priekinis paviršius.



4 priedas. Lagranžinis verifikacijos modelio plokštelės įtrūkimo vietos skerspjūvis.

Paveikslėlyje parodytas verifikacijos modelio, kur plokštei taikomas lagranžinis metodas, įtrūkimo skerspjūvis. Plokštei buvo taikomas 50 elementų pro plokštelės storį skaičius. Skerspjūvis lyginamas su Piekutowski eksperimentiniu tyrimu [53]. Galimos nesutapimo priežastys – geometrinė erozija, netinkamas elementų skaičius. Lagranžinio metodo įtrūkimo formą mažiau atitinka eksperimento rezultatams nei SPH metodo. Lagranžiniame modelyje įtrūkimo skersmuo yra 17.1 mm.



5 priedas. Bazinio efektyvumo tyrimai: visi rezultatai

Lentelėje patikti visų bazinio efektyvumo tyrimų rezultatai. Tolimesnėms patobulintų skydų tyrimams pasirinktos tyrimų 3-35, 6-70 ir 9-90 sąlygos.

Bazinio efektyvumo tyrimai:			
Tyrimas:	Efektyvumo kriterijai:		
	Priekinės plokštelės įtrūkimas d_d:	Galinės plokštelės įtrūkimas $d_d - d_h$:	Pastabos:
1-35:01	Pilna perforacija 2.0 mm	Plokštelė nepaveikta	Galinė plokštelė: nekritis įtrūkimas.
1-70:01	Pilna perforacija 3.2 mm	Minimalūs įtrūkimai	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
1-90:01	Pilna perforacija 6.2 mm	Minimalūs įtrūkimai	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
2-35:01	Pilna perforacija 4.0 mm	Dalinė perforacija 2.0 mm – 0.3 mm	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
2-70:01	Pilna perforacija 5.4 mm	Minimalūs įtrūkimai	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
2-90:01	Pilna perforacija 6.1 mm	Minimalūs įtrūkimai	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
3-35:01	Pilna perforacija 5.2 mm	Dalinė perforacija 3.8 mm – 1.2 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritis įtrūkimas.
3-70:01	Pilna perforacija 6.6 mm	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.3 mm	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
3-90:01	Pilna perforacija 7.6 mm	Dalinė perforacija 0.8 mm – 0.5 mm	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Nekritis įtrūkimas.
6-35:01	Pilna perforacija 9.2 mm	Pilna perforacija 1.2 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritis įtrūkimas
6-70:01	Pilna perforacija 10.7 mm	Pilna perforacija 1.4 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių prie plokštelės centro. Kritis įtrūkimas. Pilna perforacija dėl didelio medžiagos vientisumo praradimo.

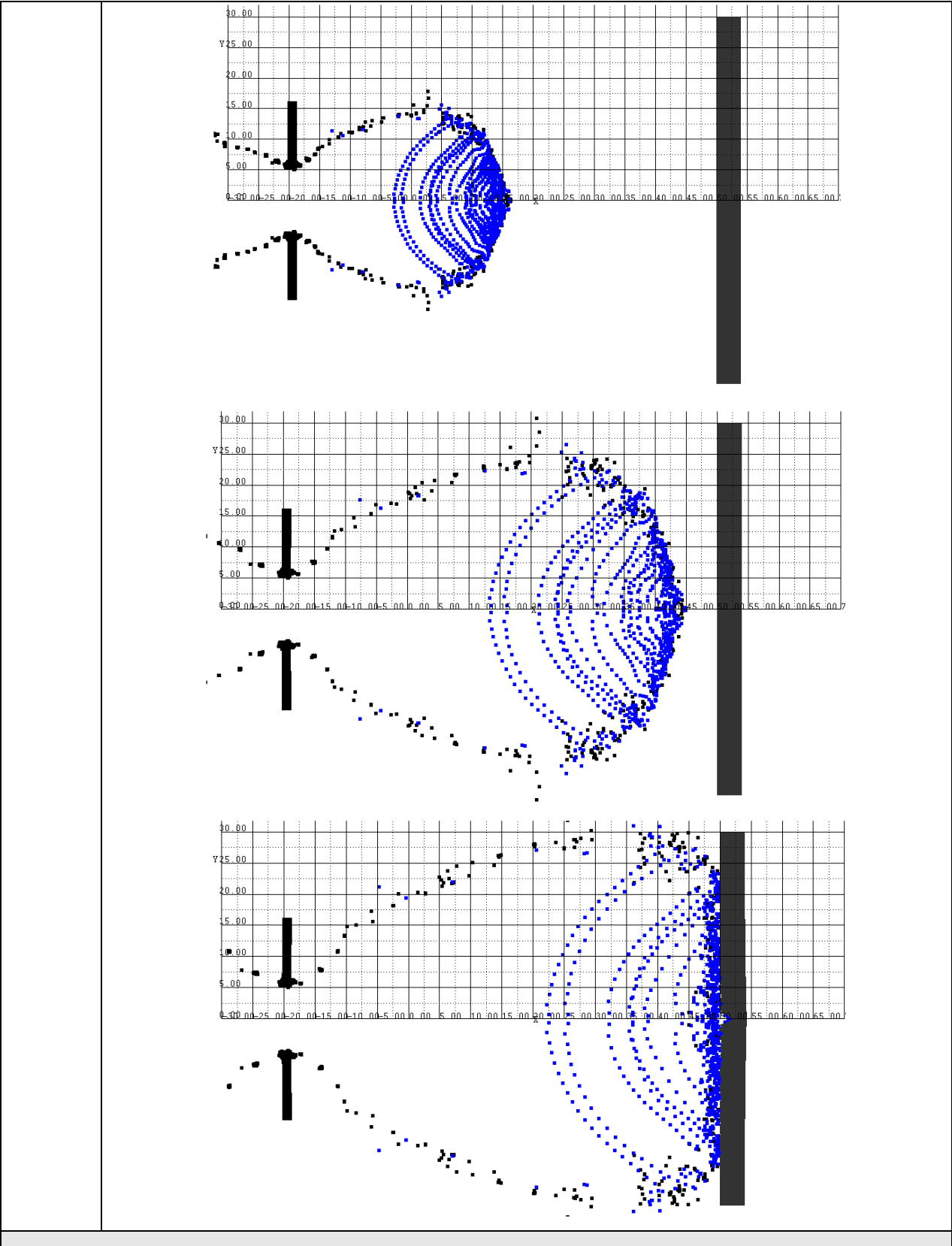
6-90:01	Pilna perforacija 11.0 mm	Pilna perforacija 1.8 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: vienas krateris plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.
9-35:01	Pilna perforacija 12.8 mm	Pilna perforacija 18.0 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daug kraterių plokštelės centre. Kritinis įtrūkimas.
9-70:01	Pilna perforacija 13.6 mm	Pilna perforacija 23.2 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daug kraterių plokštelės centre. Plokštelė patyrė didelę spaliaciją. Kritinis įtrūkimas.
9-90:01	Pilna perforacija 14.6 mm	Pilna perforacija 24.8 mm – 4.0 mm Spaliacija	Galinė plokštelė: daugelis kraterių visame plokštelės paviršiuje. Plokštelė patyrė didelę spaliaciją. Kritinis įtrūkimas.

6 priedas. Bazinio skydo tyrimai

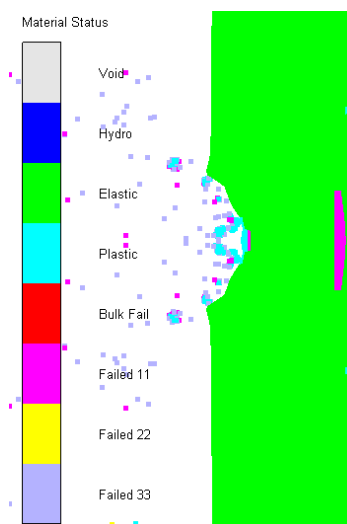
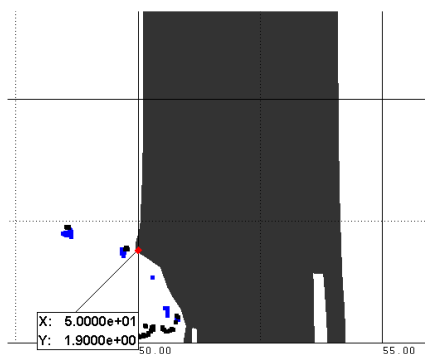
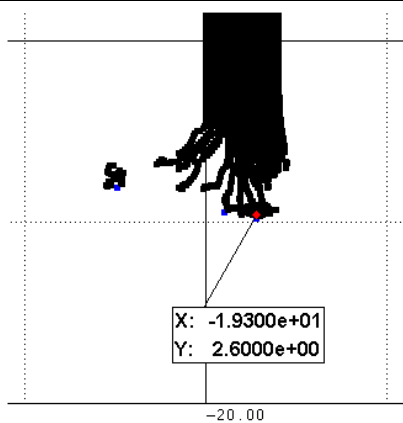
Pirmoje lentelėje pateikti trijų pasirinktų bazinio skydo tyrimų vaizdai, parodantys priekinės plokštelės įtrūkimus ir jų matavimą. Taip pat parodyti galinės plokštelės įtrūkimai ir jos medžiagos būseną plokštelės centre (žalia – elastiška, žydra - plastinė, violetinė – atitrūkusi/suirusi X-X plokštumoje. Kitos būsenos yra nereikšmingos). Tokiu būdu, pirmas paveikslėlis parodo priekinę plokštelę, antras - galinę. Pateikti tyrimo 6-70:01 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

Antroje lentelėje pateikti kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės – žalios, galinės plokštelės – raudonos.

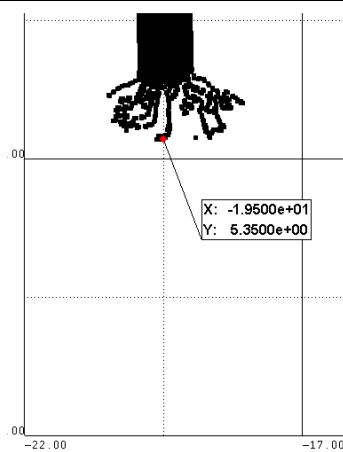
Bazinio efektyvumo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	

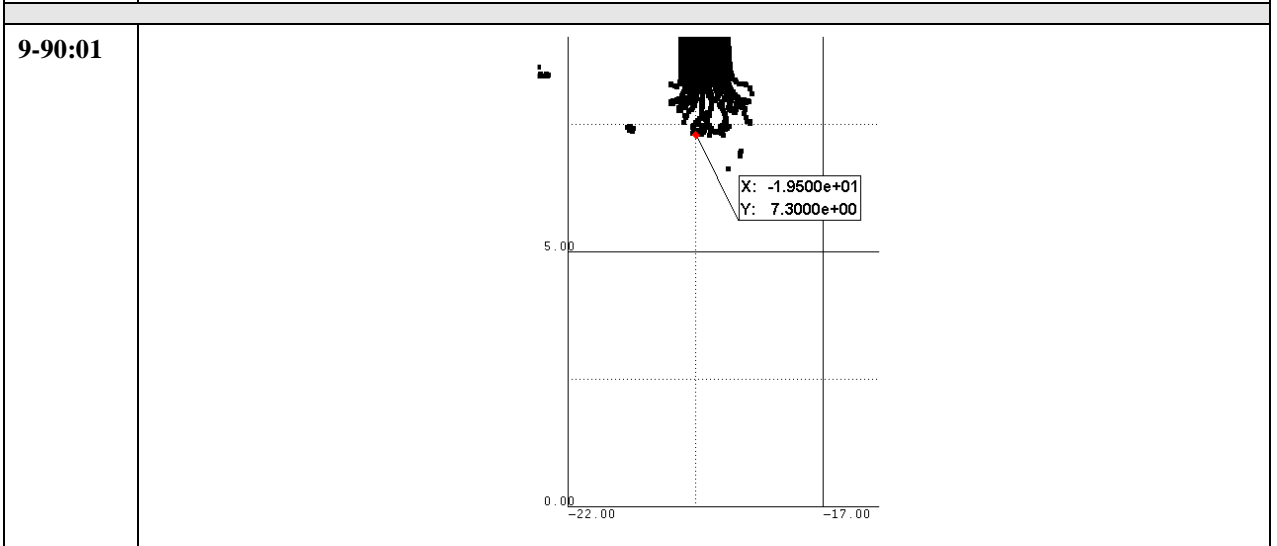
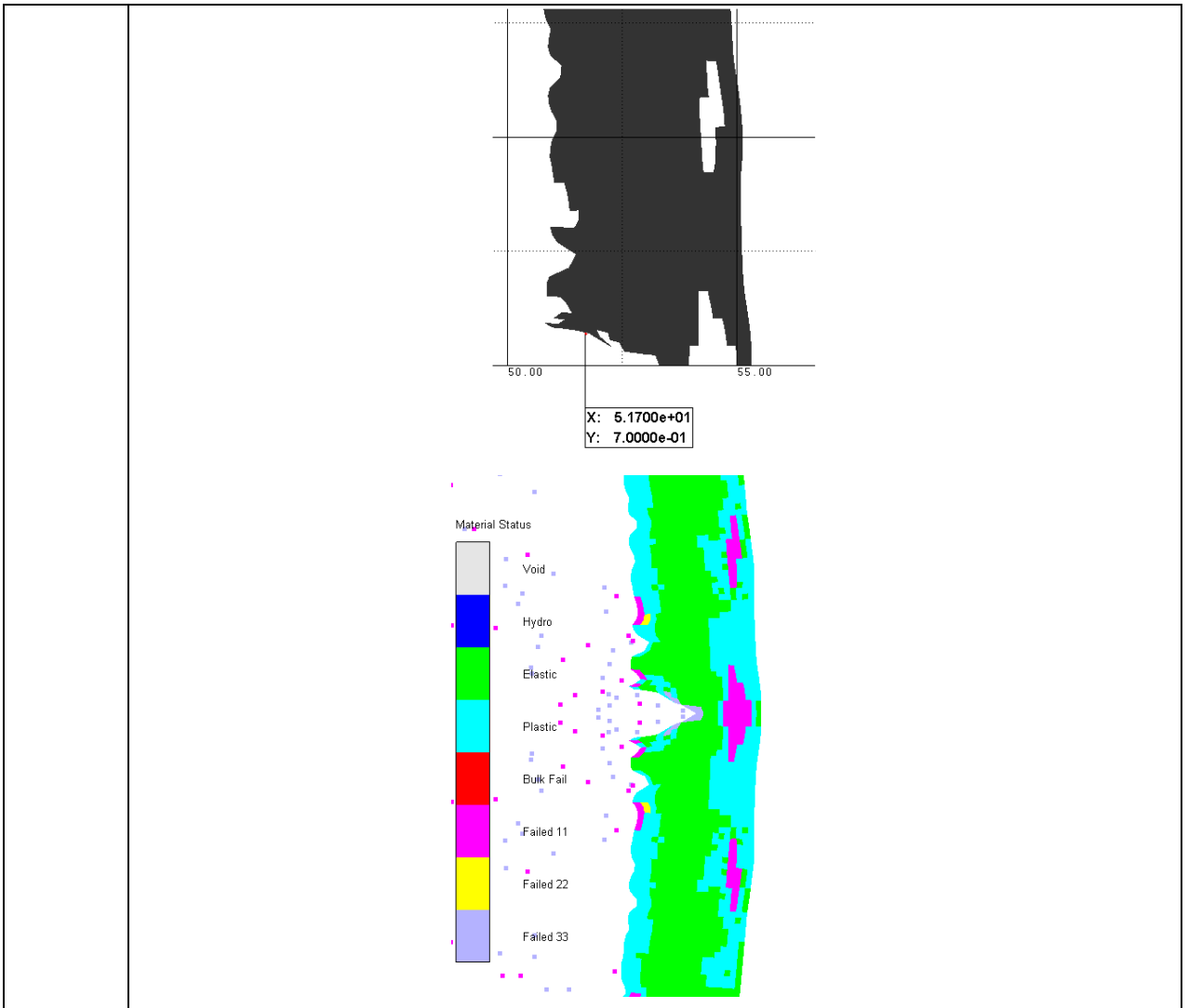


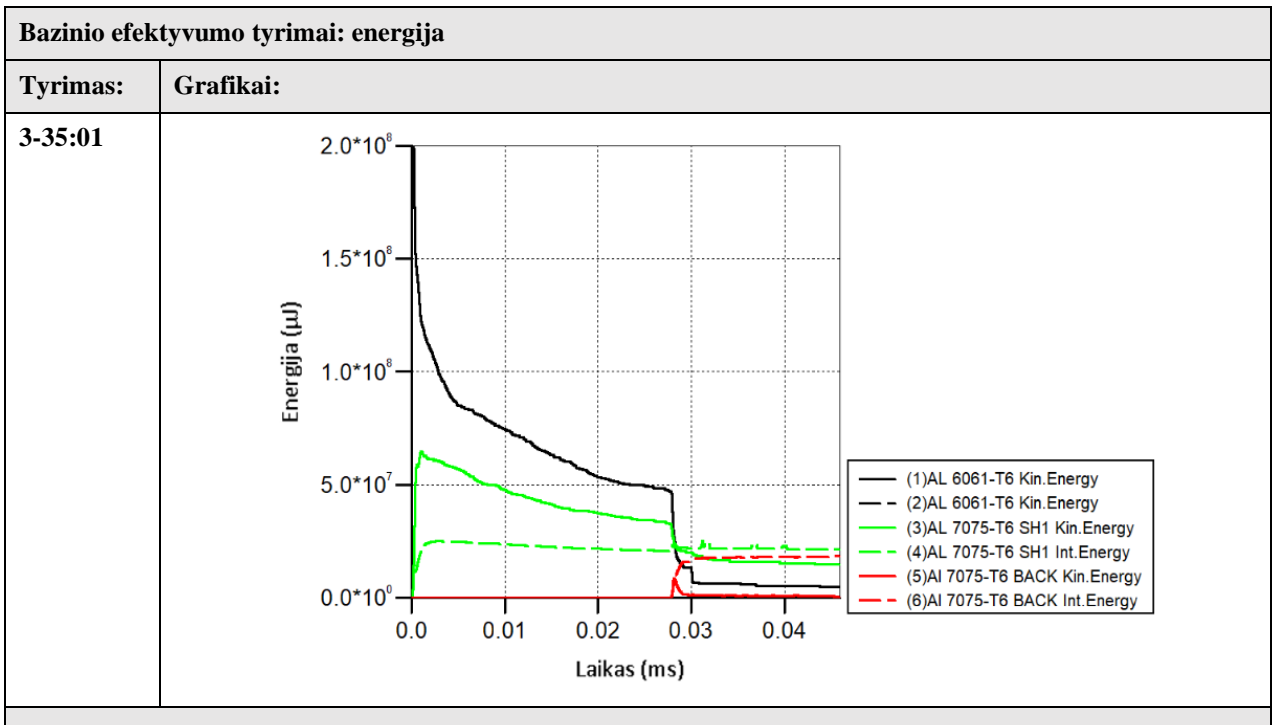
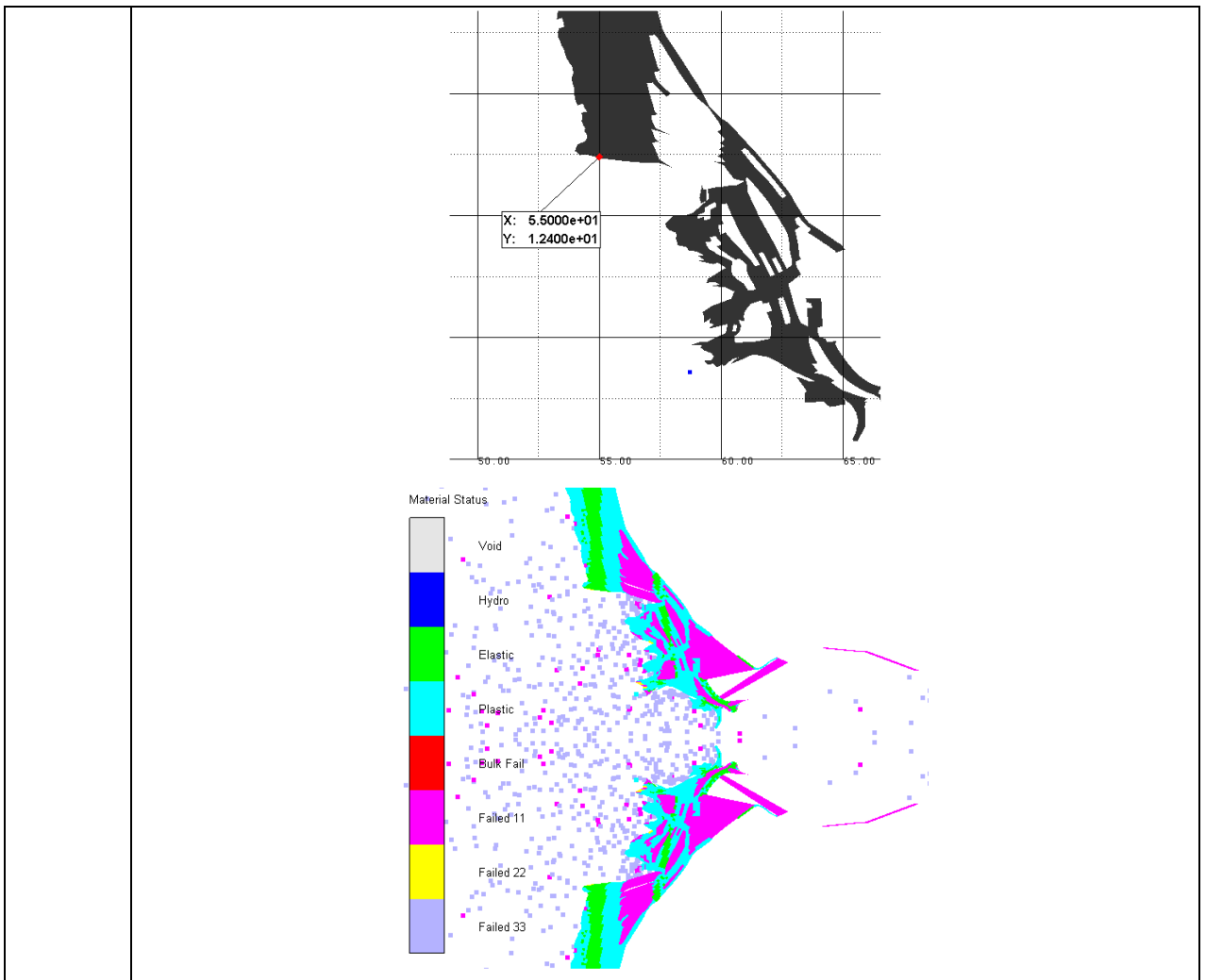
3-35:01



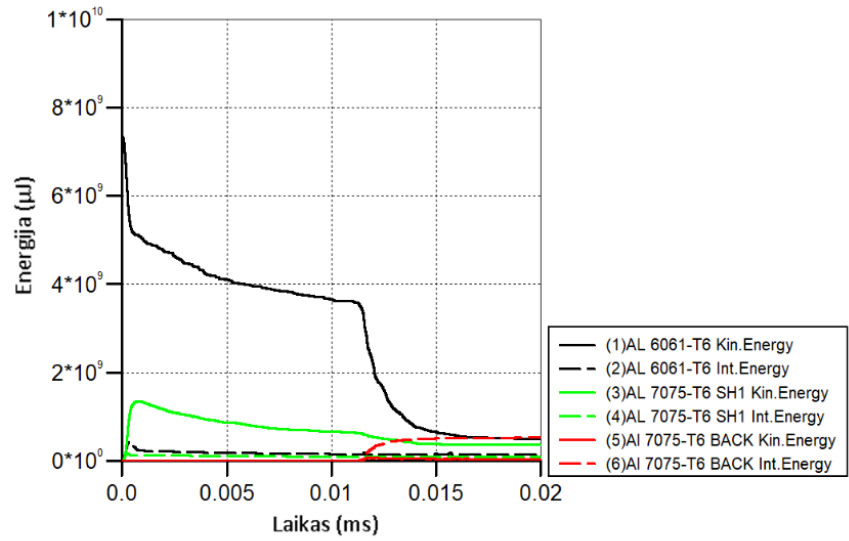
6-70:01



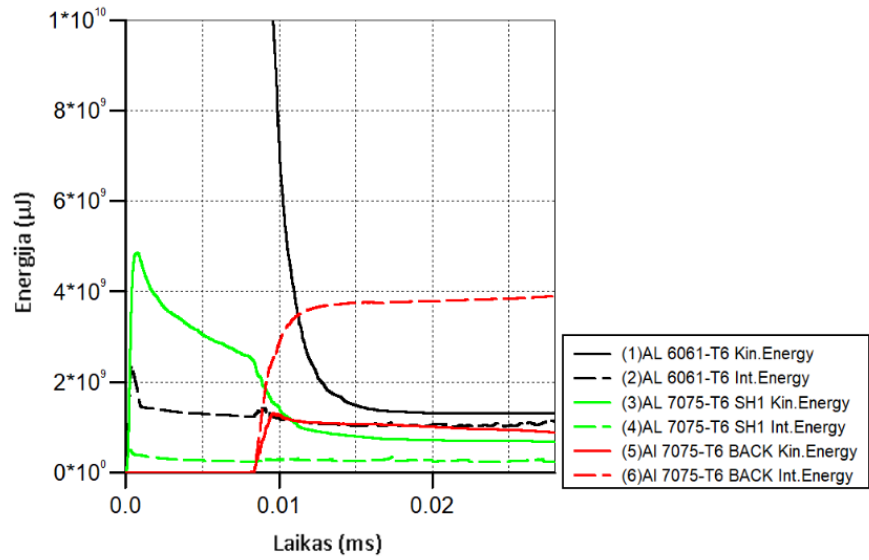




6-70:01



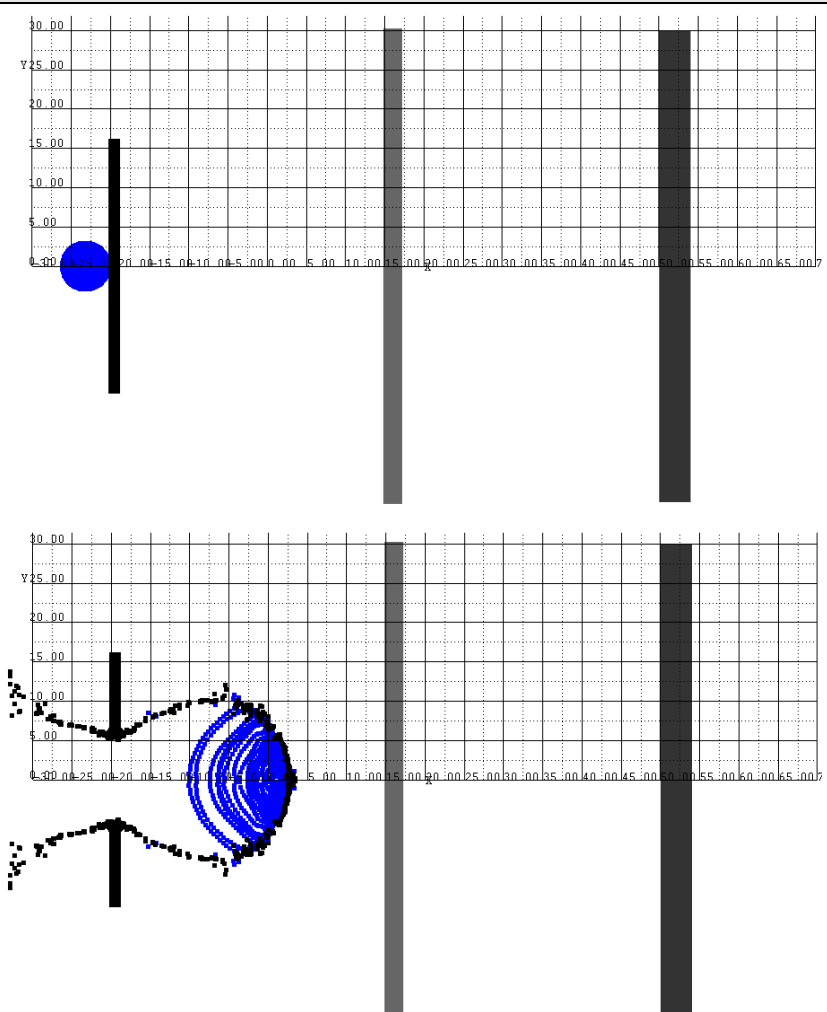
9-90:01

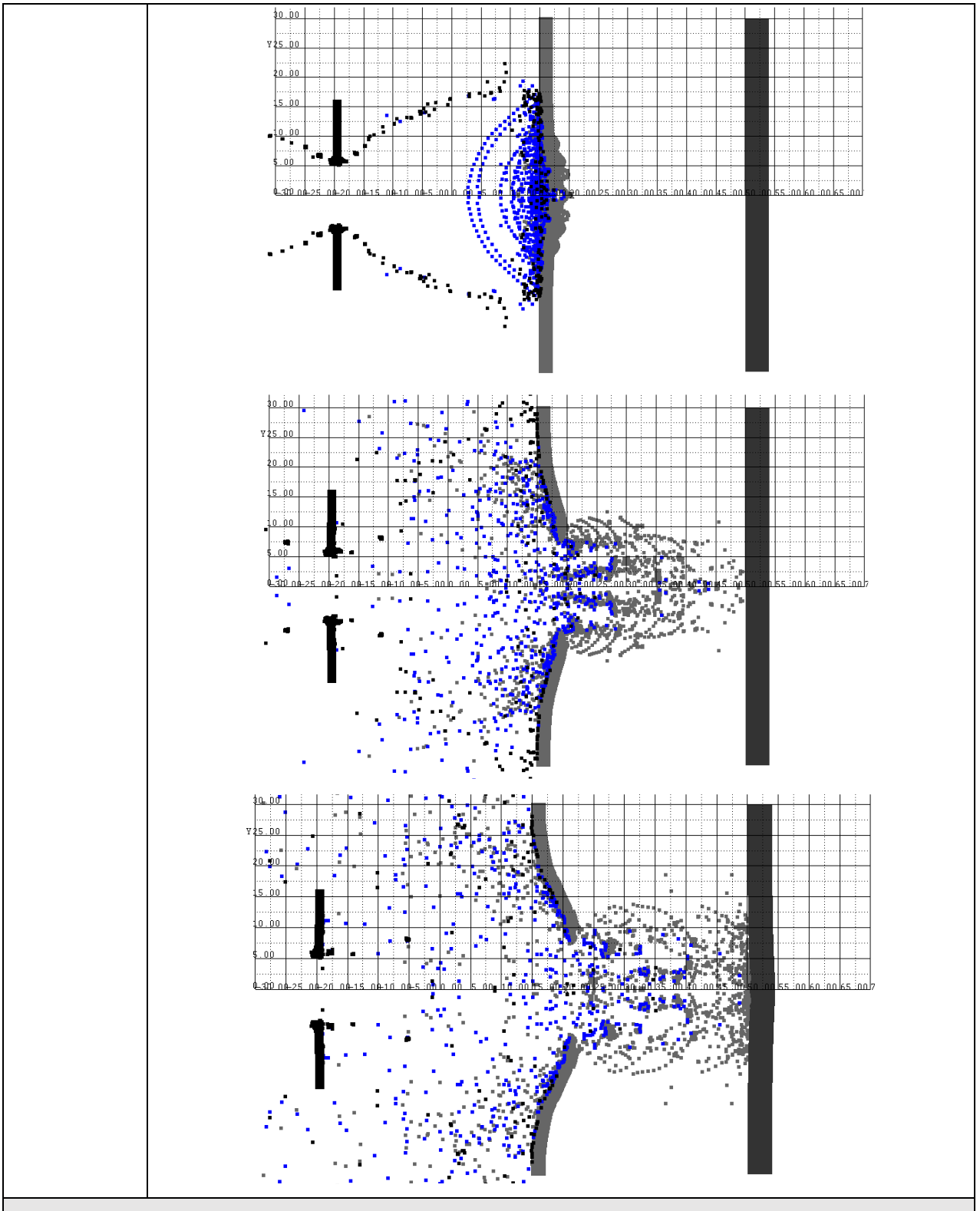


7 priedas. Skydo patobulinimas: tarpinės plokštelės tyrimai

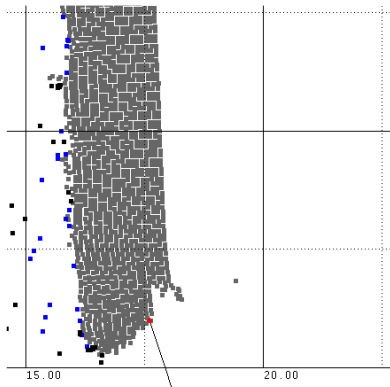
Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys tarpinės plokštelės įtrūkimus ir jų matavimą. Šiuo atveju, priekinės plokštelės įtrūkimai identiški bazinio skydo tyrimams (žr. 6 priedą). Taip pat parodyti galinės plokštelės įtrūkimai ir jos medžiagos būseną plokštelės centre. Pateikti tyrimo 6-70:02 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

Antroje lentelėje pateikti kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės – žalios, tarpinės plokštelės – geltonos, galinės plokštelės – raudonos.

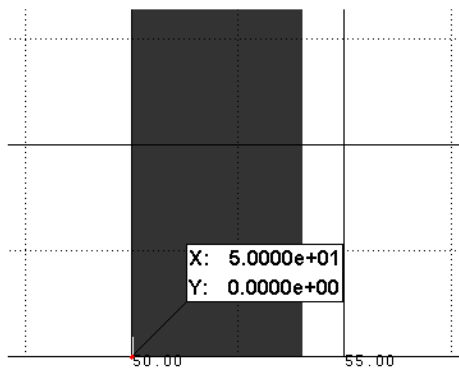
Tarpinės plokštelės tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	



3-35:02

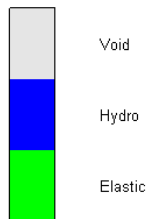


X: 1.7600e+01
Y: 1.0000e+00

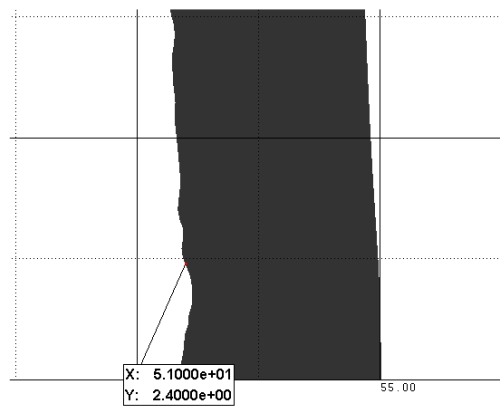
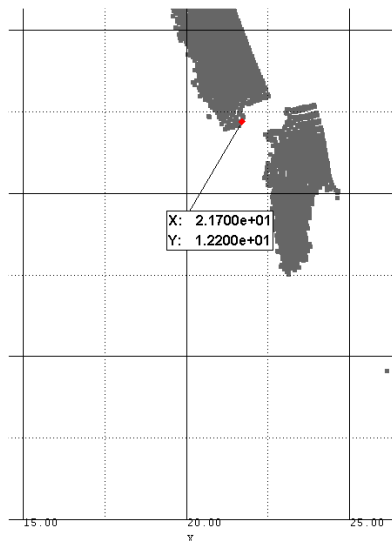


X: 5.0000e+01
Y: 0.0000e+00

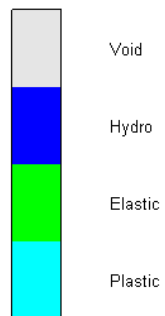
Material Status



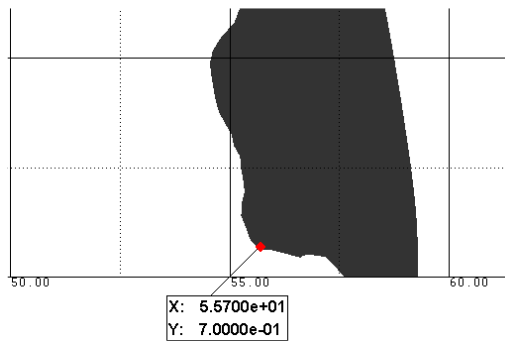
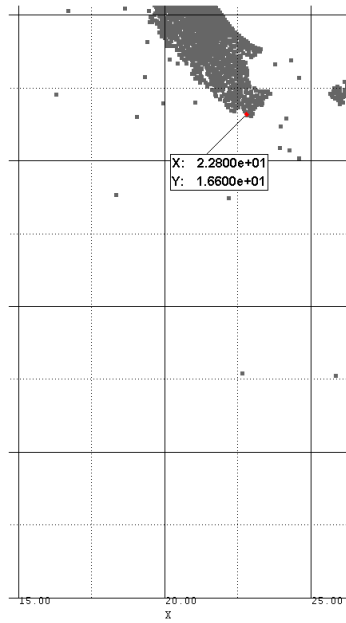
6-70:02



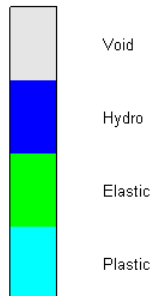
Material Status



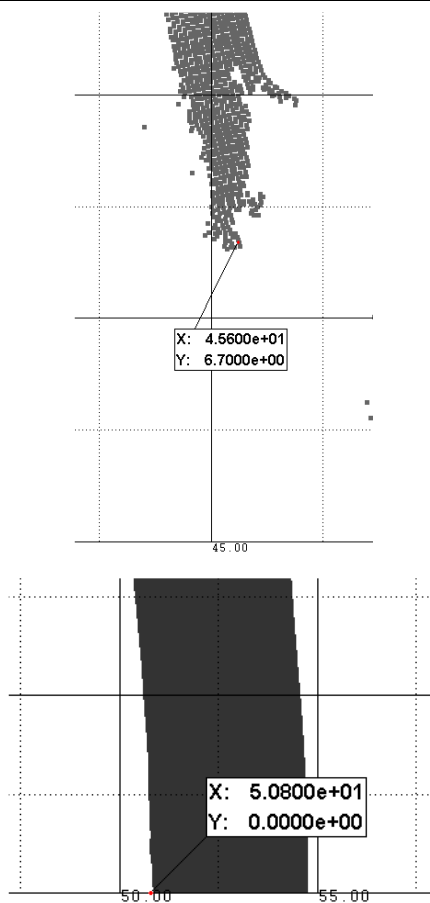
9-90:02



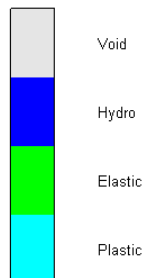
Material Status



6-70:02
papildoma



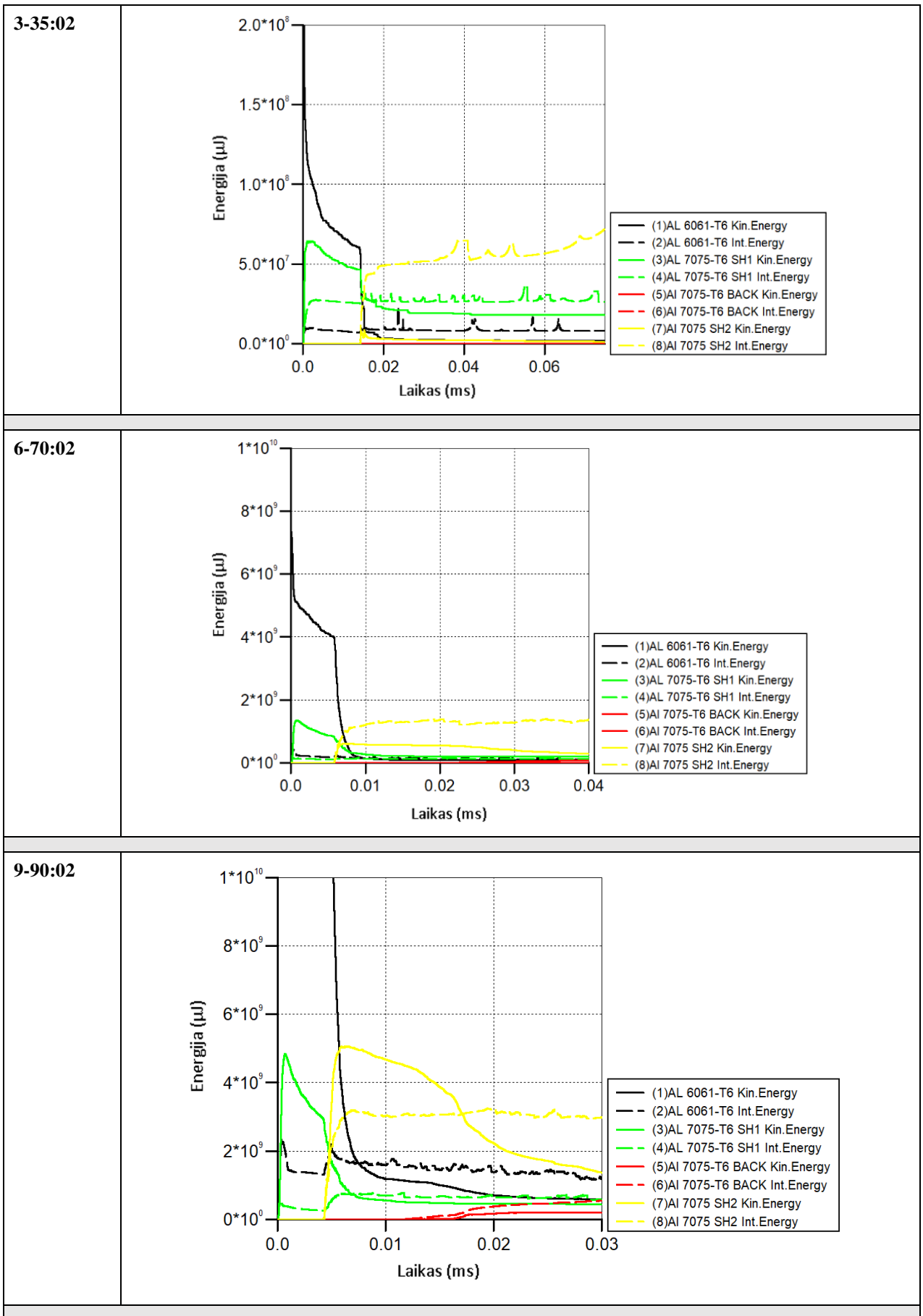
Material Status



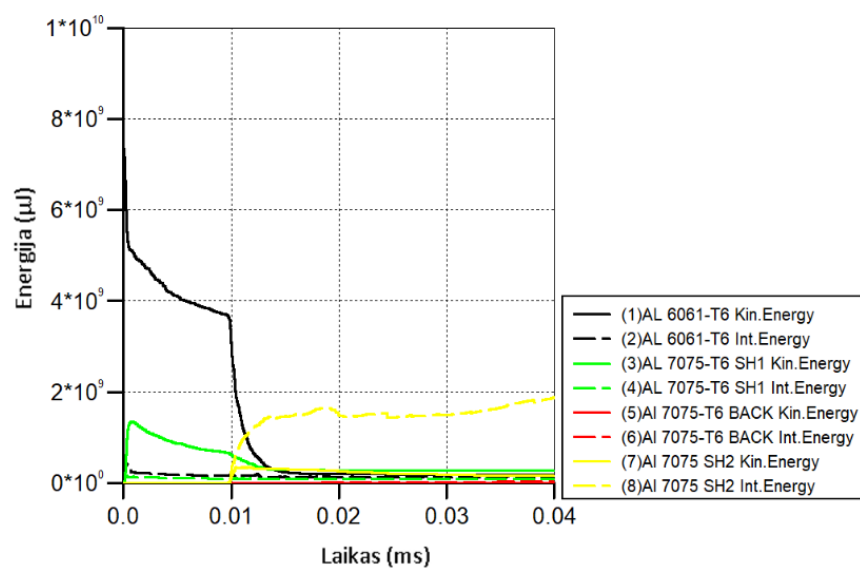
Tarpinės plokštelės tyrimai: energija

Tyrimas:

Grafikai:



6-70:02
papildoma

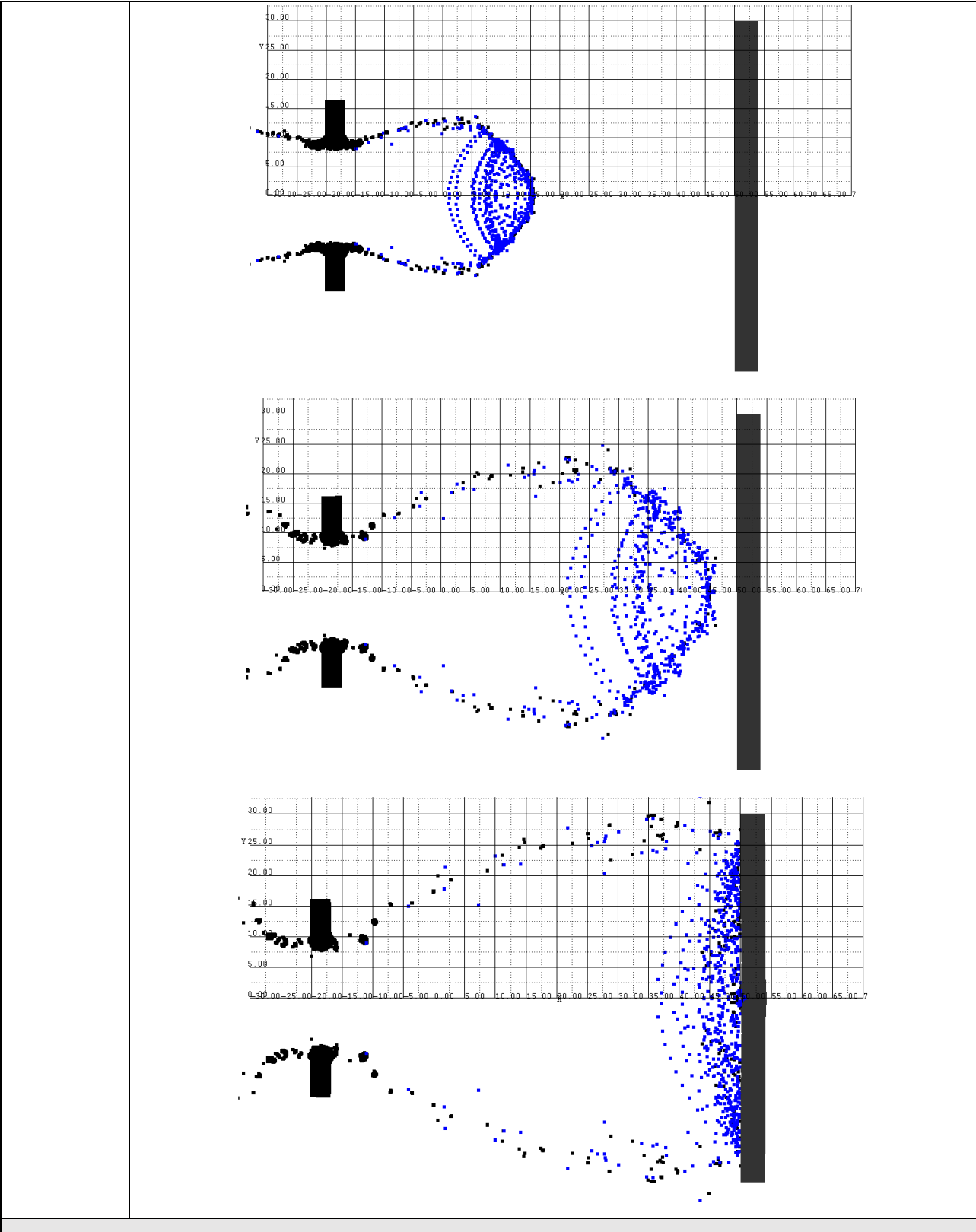


8 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai

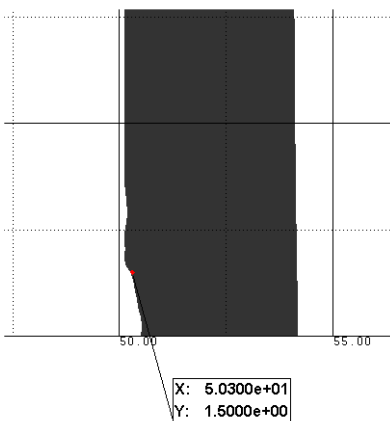
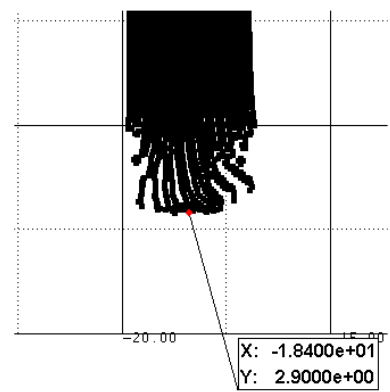
Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys priekinės plokštelės įtrūkimus ir jų matavimą. Taip pat parodyti galinės plokštelės įtrūkimai ir jos medžiagos būseną plokštelės centre. Pateikti tyrimo 6-70:03 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

Antroje lentelėje pateikti kinetinės (pilna) ir vidinės (brūkšniuota) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės – žalios, galinės plokštelės – raudonos.

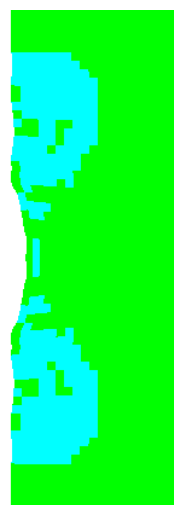
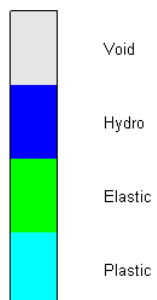
Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	



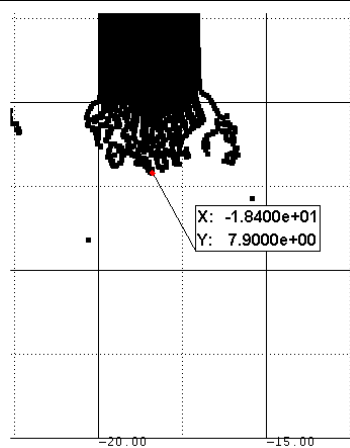
3-35:03

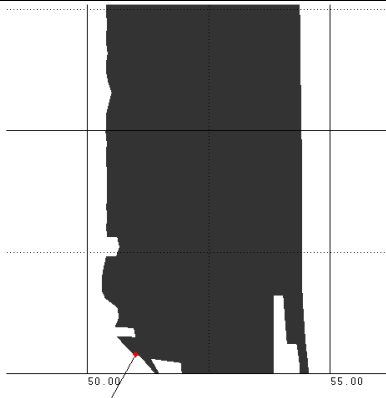


Material Status



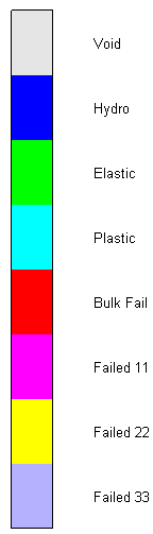
6-70:03



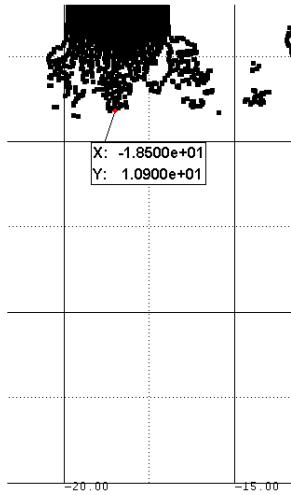


X: 5.1000e+01
Y: 4.0000e-01

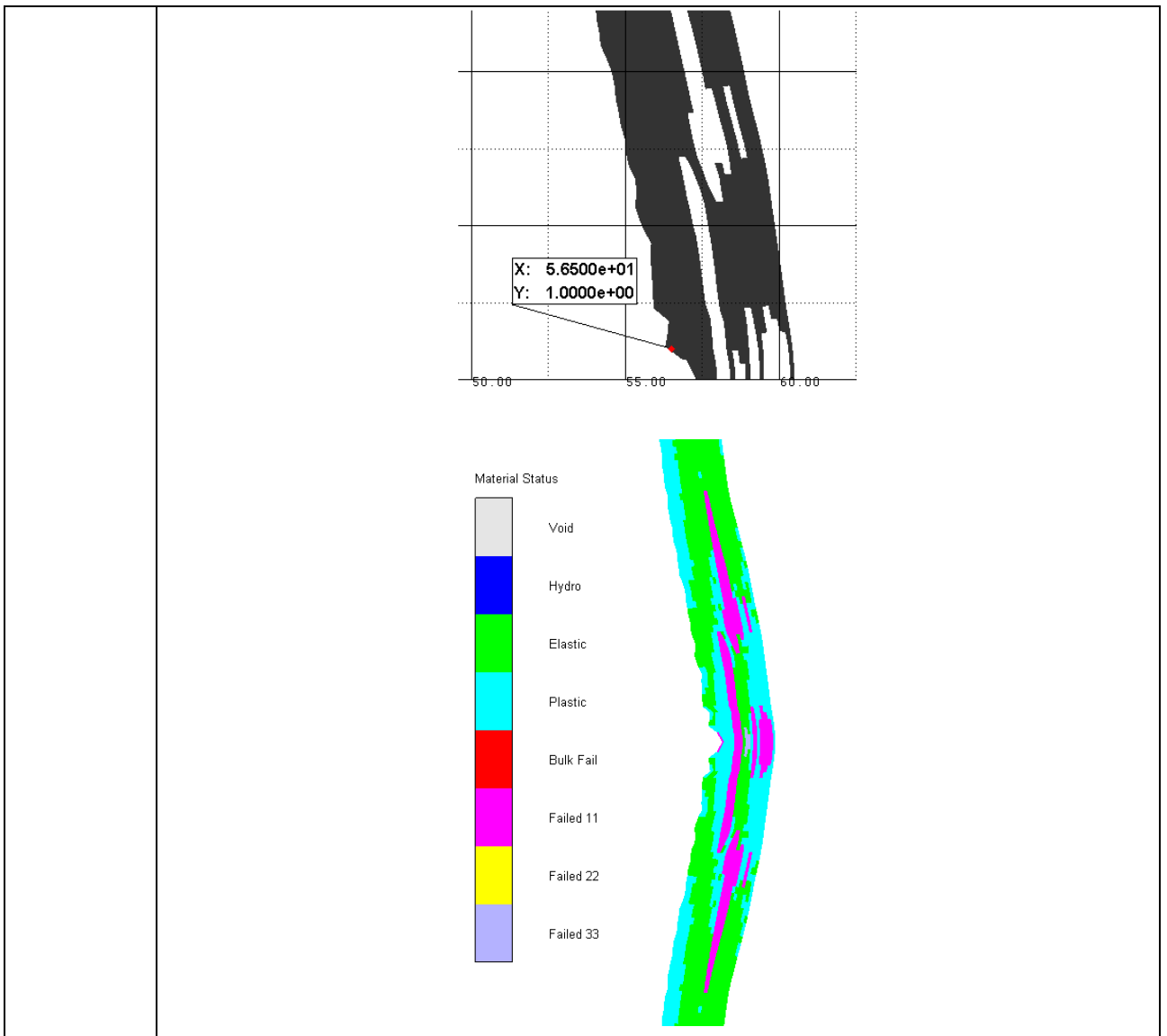
Material Status



9-90:03

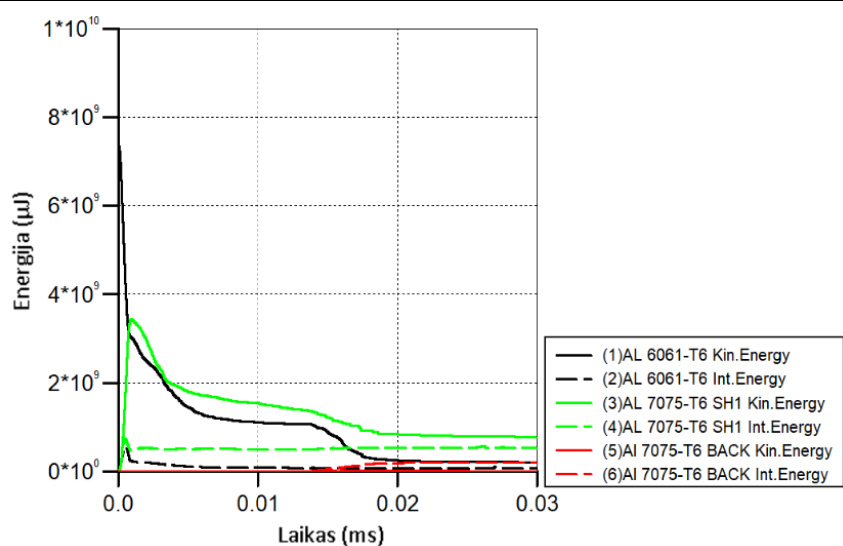


X: -1.8500e+01
Y: 1.0900e+01

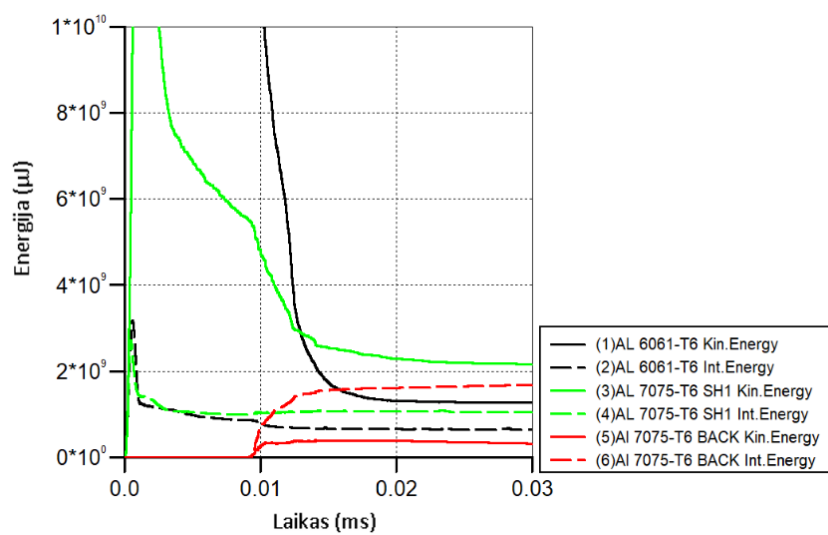


Priekinės plokštelės storio koregavimo tyrimai: energija	
Tyrimas:	Grafikai:
3-35:03	

6-70:03



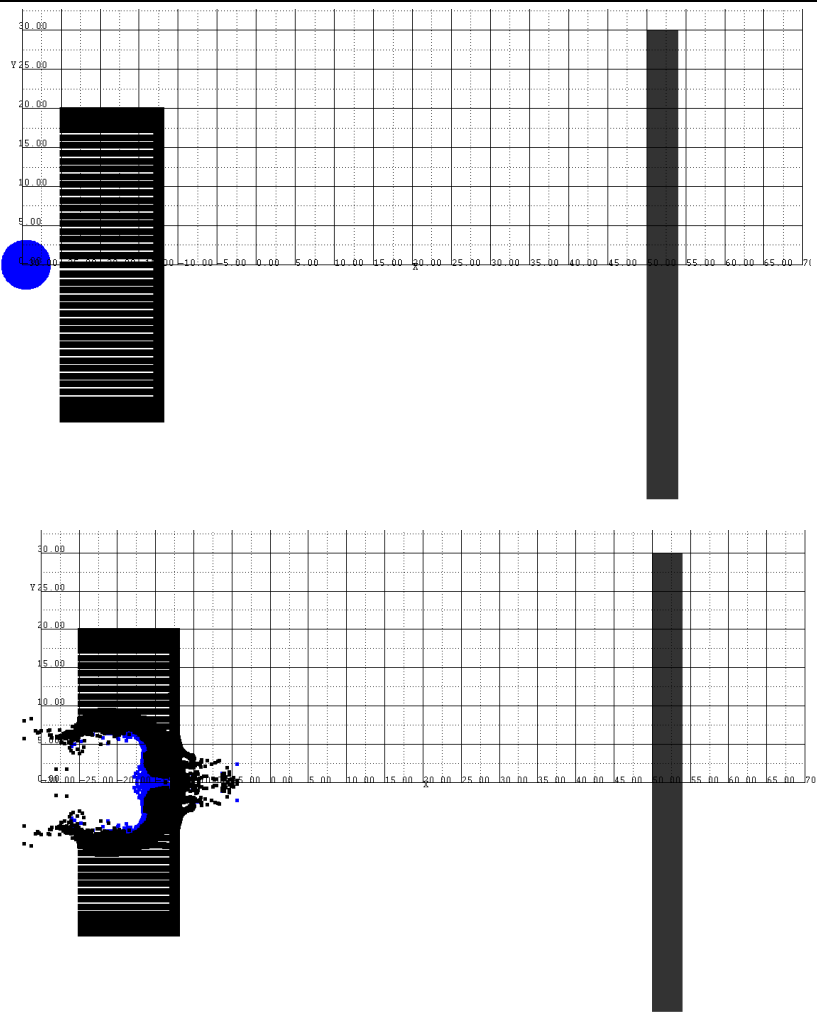
9-90:03

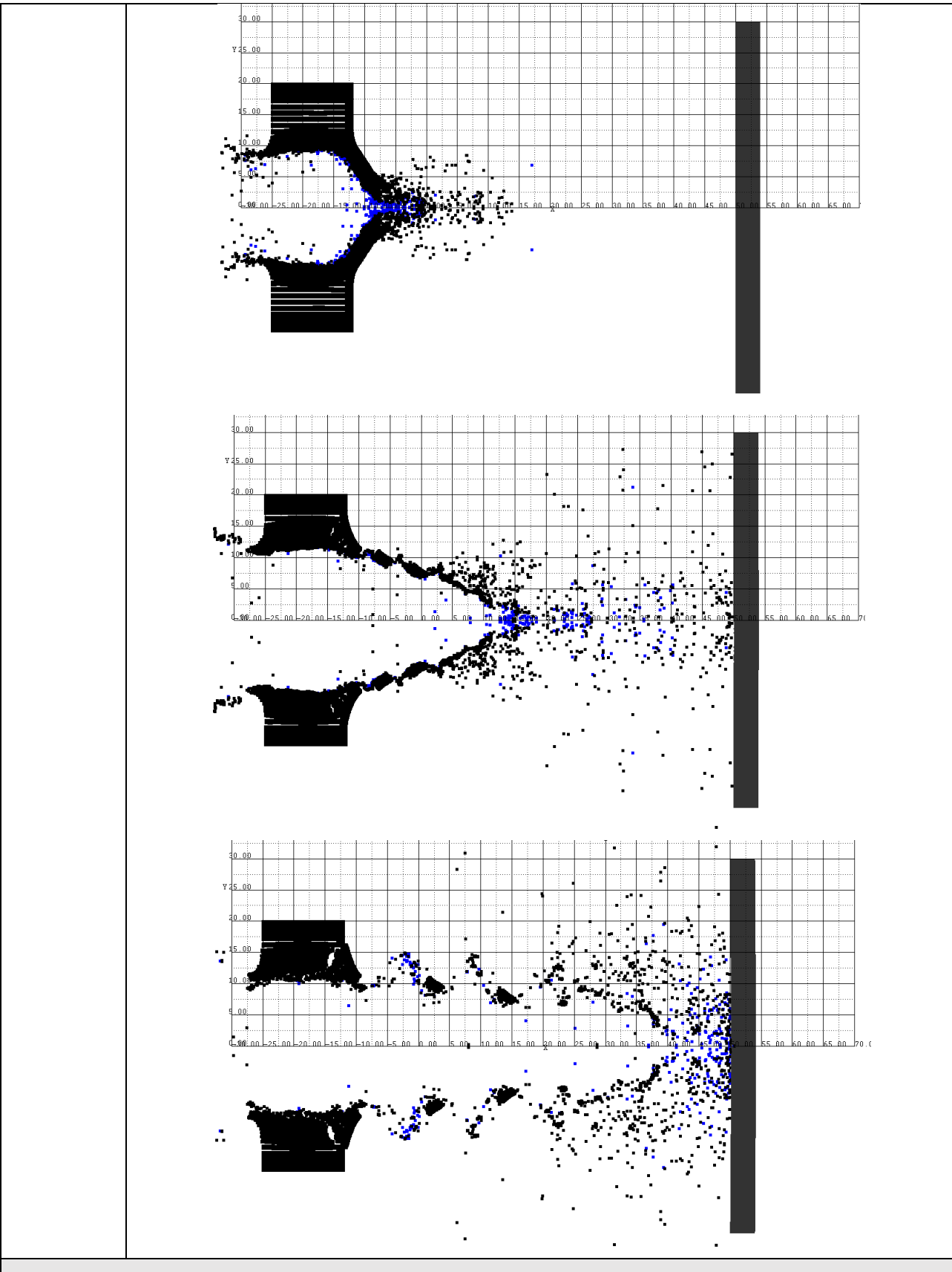


9 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimai

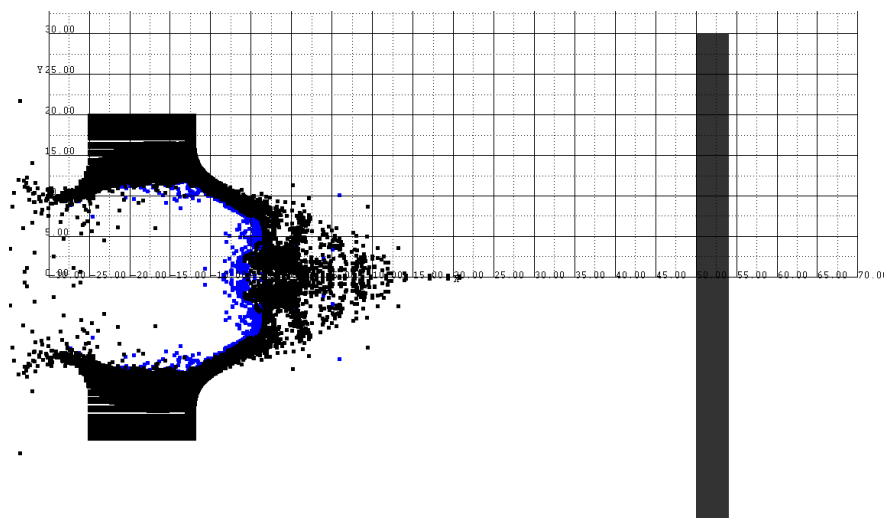
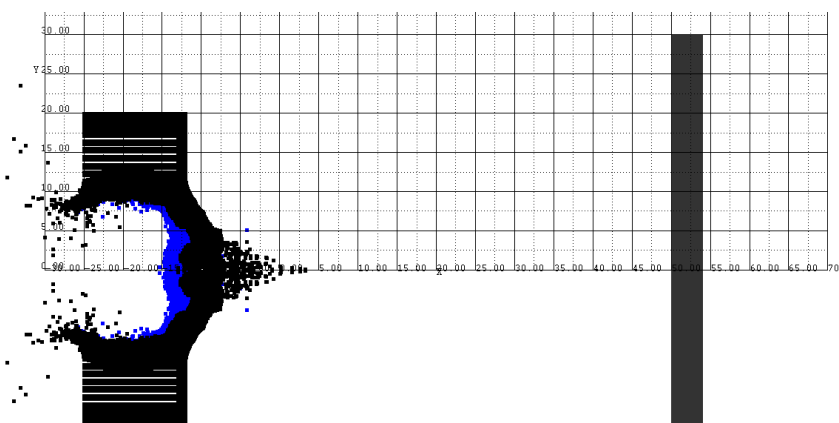
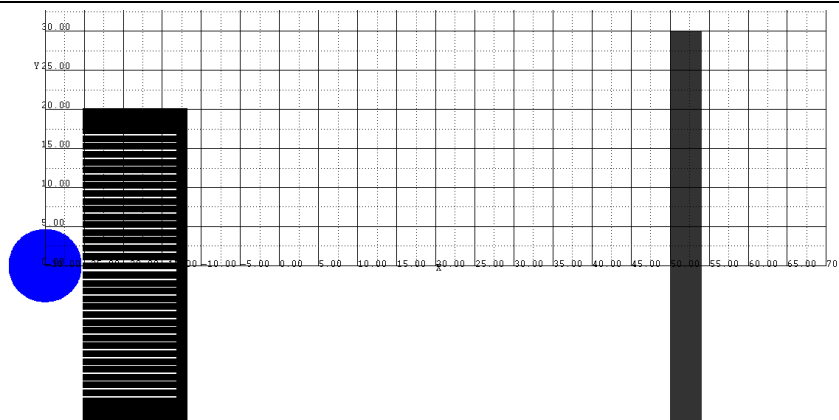
Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys priekinės plokštelės įtrūkimus ir jų matavimą. Taip pat parodyti galinės plokštelės įtrūkimai ir jos medžiagos būseną plokštelės centre. Pateikti papildomo tyrimo 6-70:04 ir 9-90:04 bendri viso modelio erdvės vaizdai, pabrėžiamas „kanalo“ efektas. Pateikiami bendri tyrimo 9-90:04 vaizdai parodo 9 mm dalelės smūgį į papildomo tyrimo struktūrą, geresniam „kanalo“ efekto atvaizdavimui (bet 9-90:04 užfiksuoti rezultatai yra standartinio tyrimo).

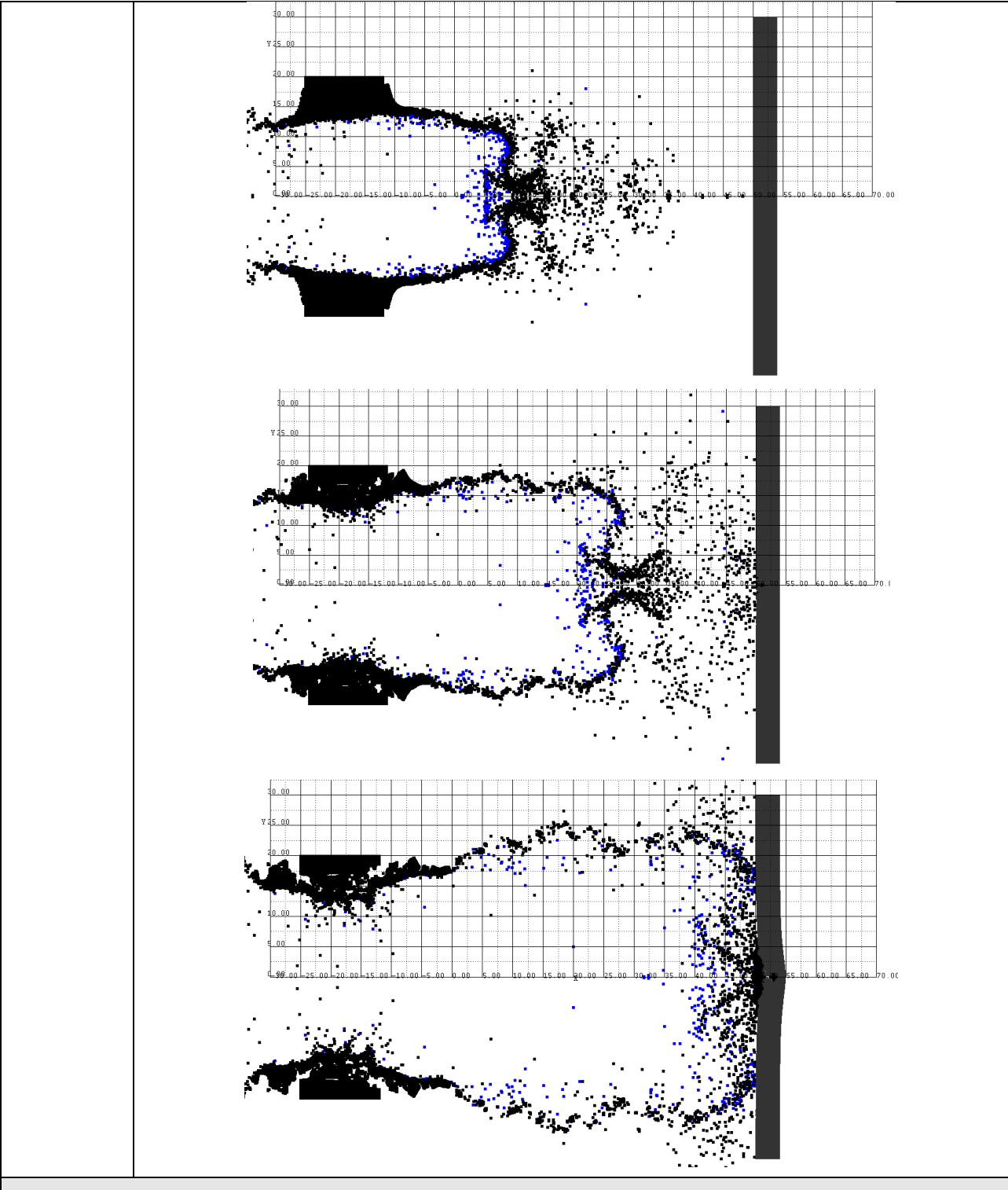
Antroje lentelėje pateikti kūnų kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės – žalios, galinės plokštelės – raudonos.

Priekinės plokštelės struktūros koregavimo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimai:	Vaizdai:
Bendri vaizdai 6-70:04 papildoma	

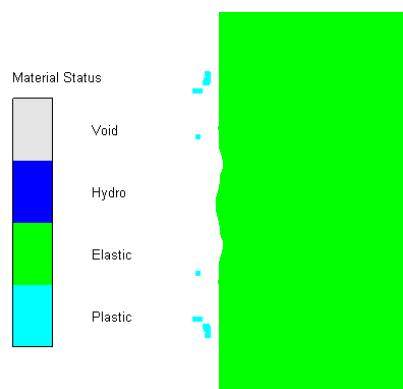
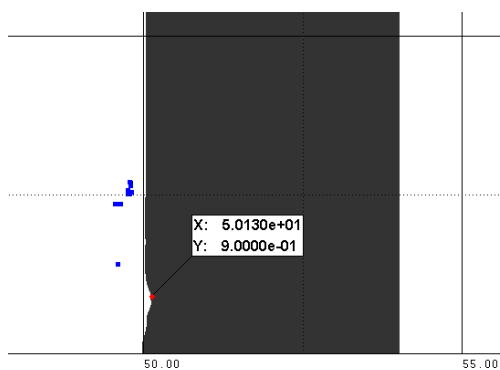
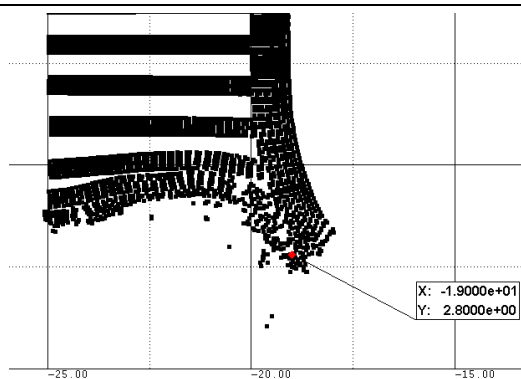


**Bendri
vaizdai
9-90:04
papildoma**

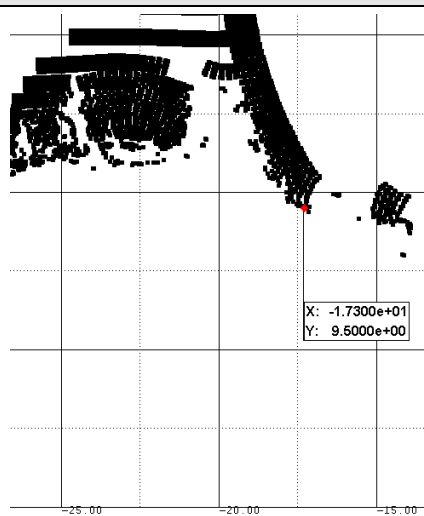


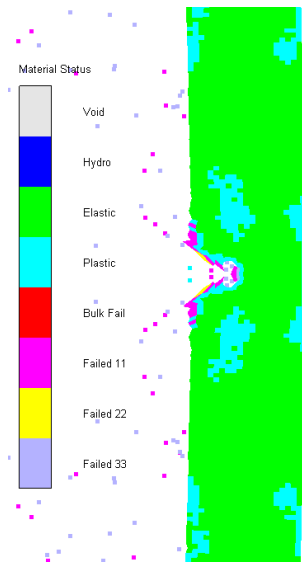
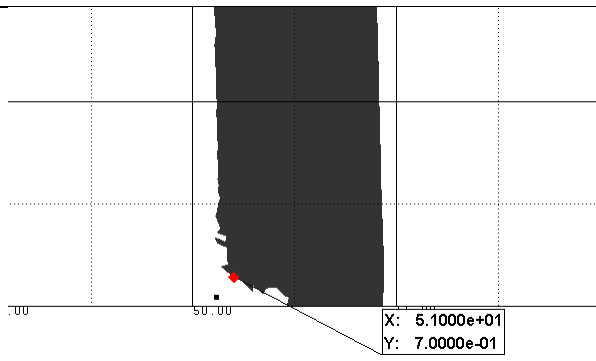


3-35:04

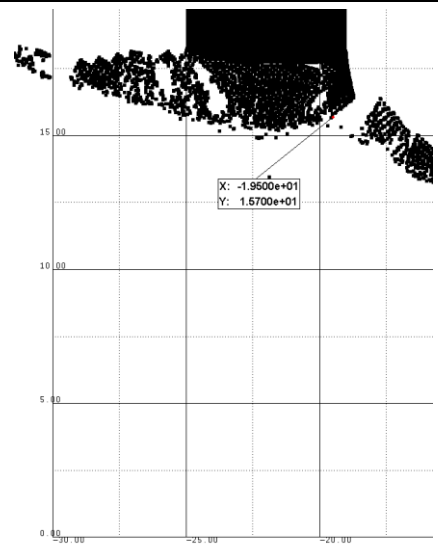


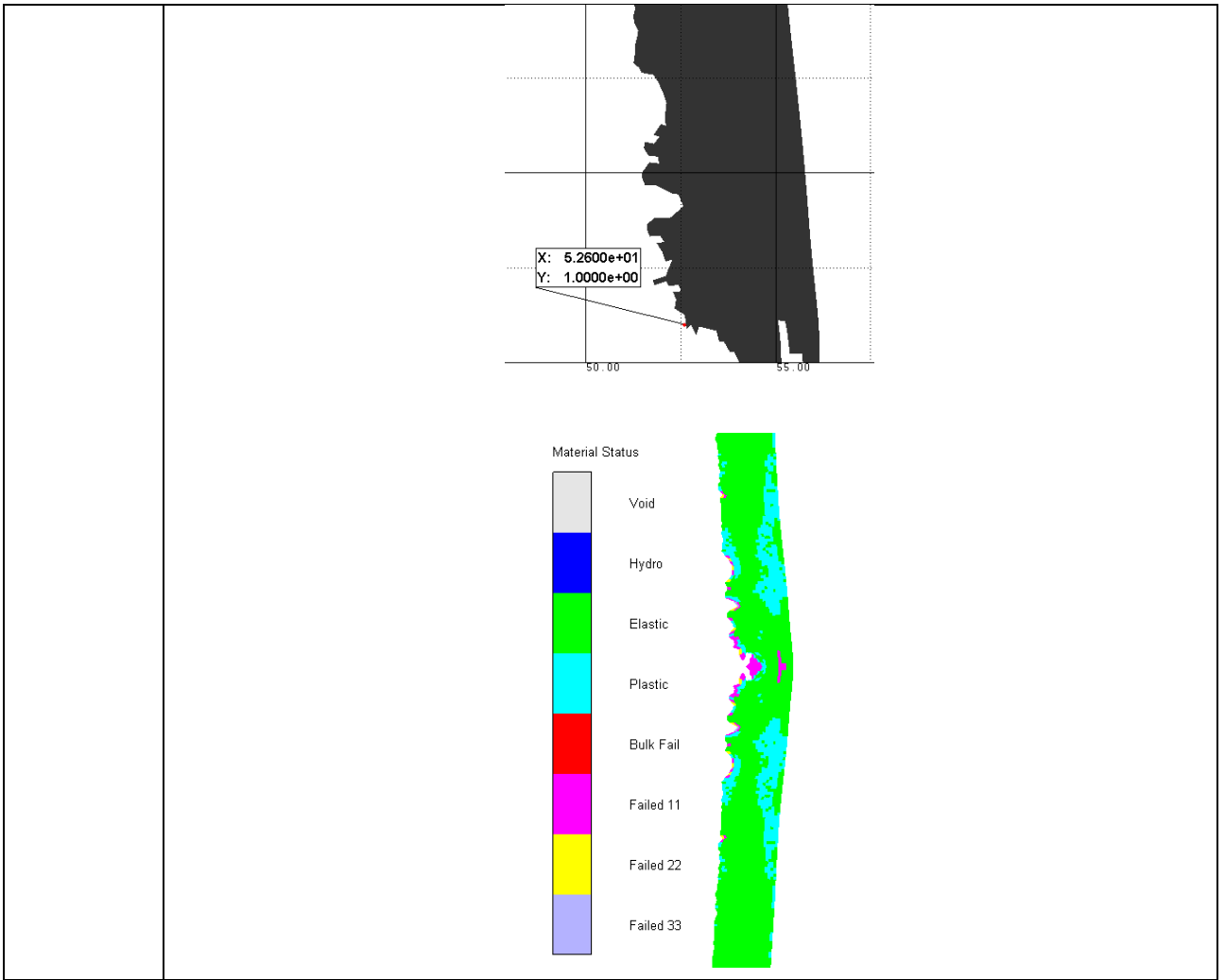
6-70:04



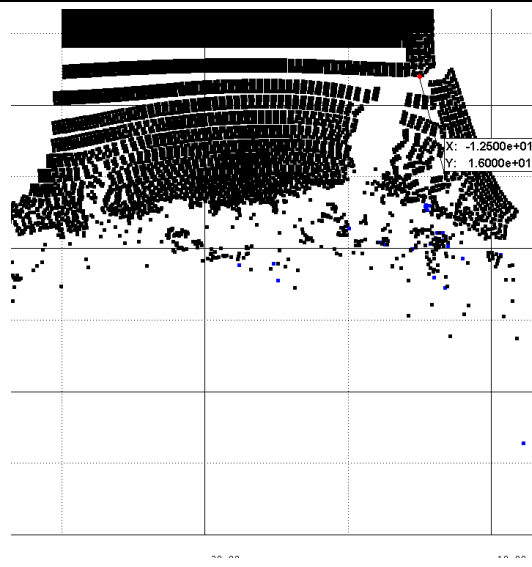


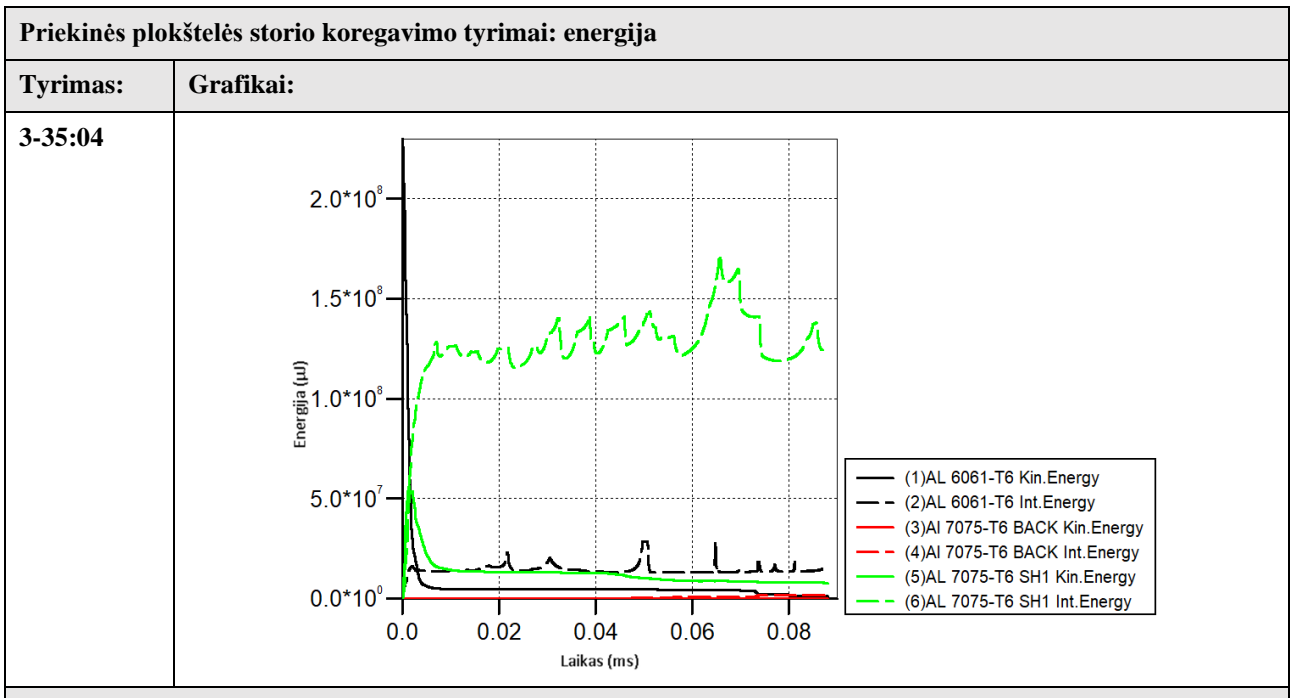
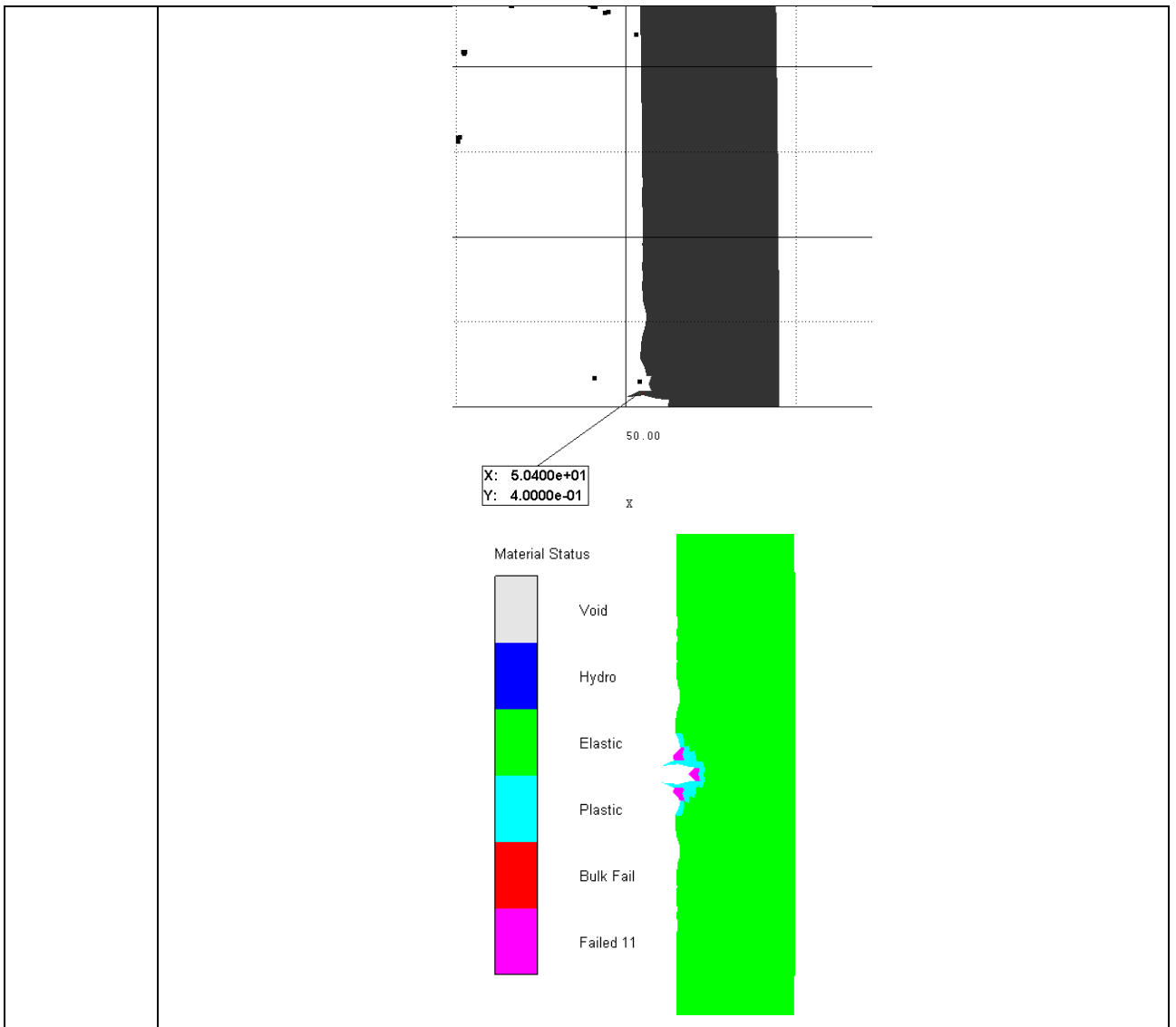
9-90:04

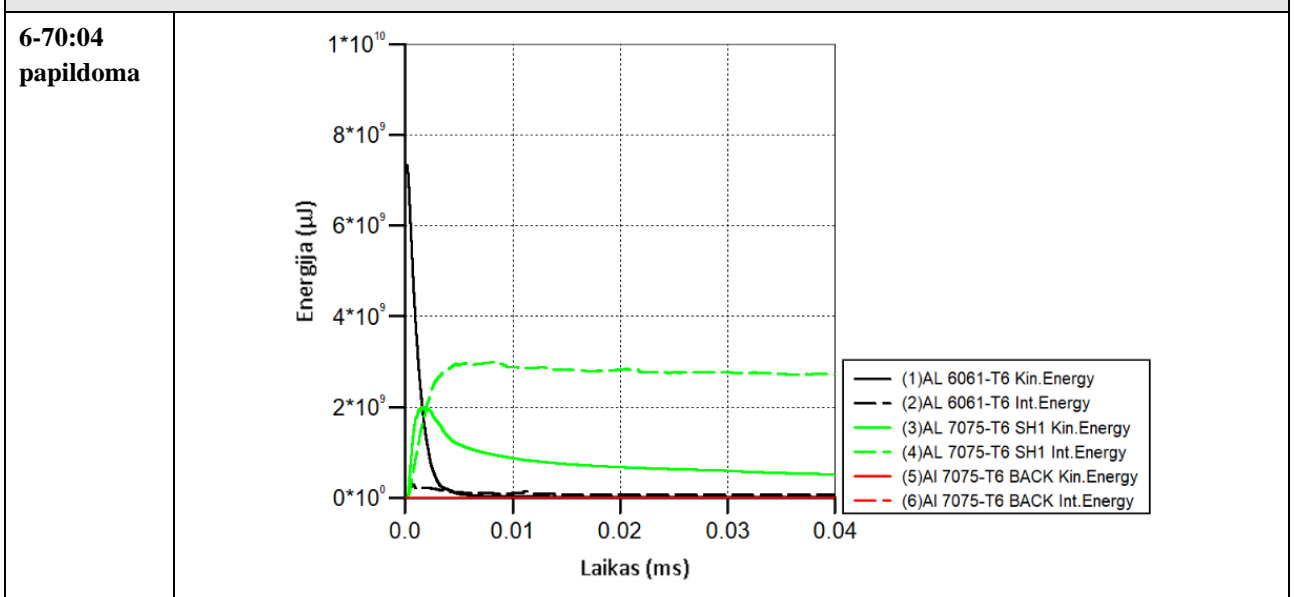
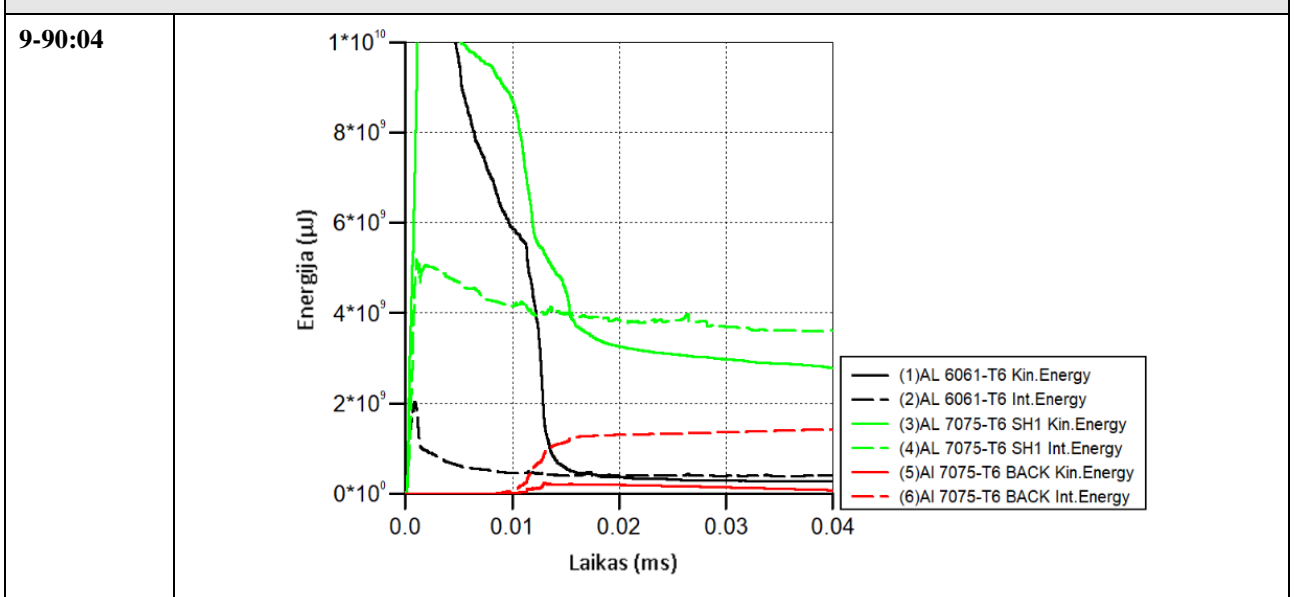
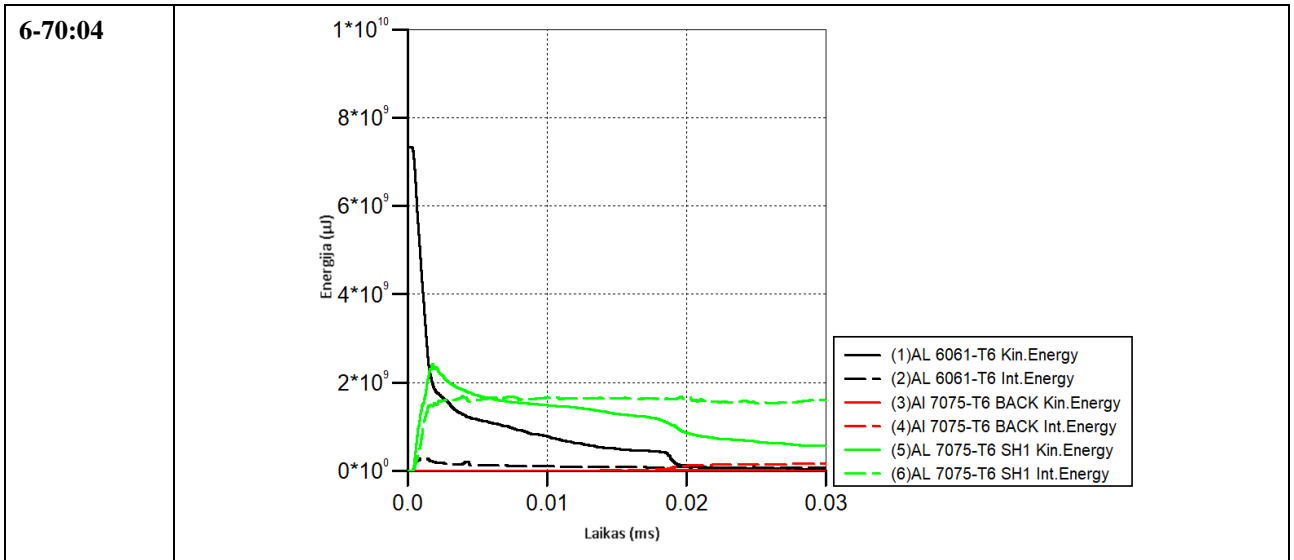




6-70:04
papildoma





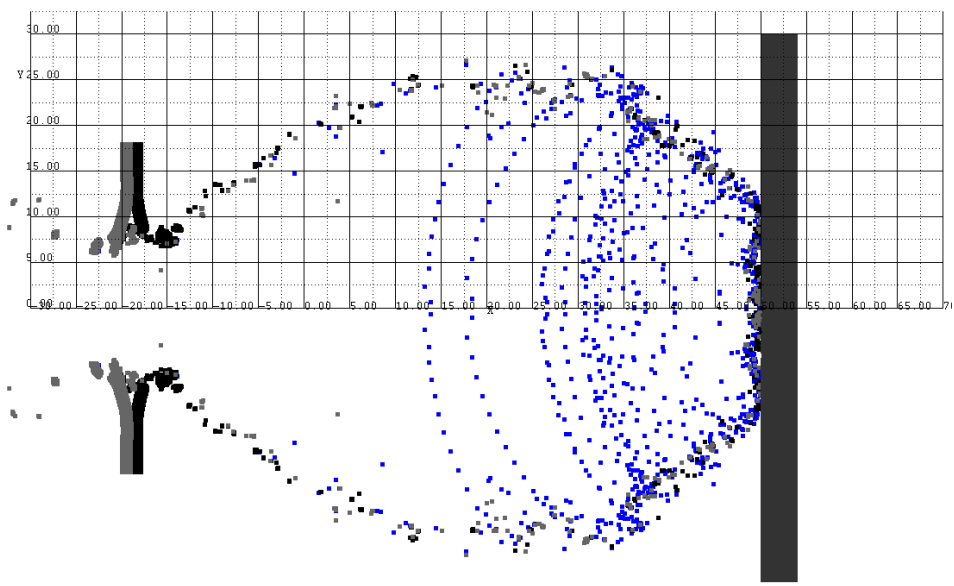
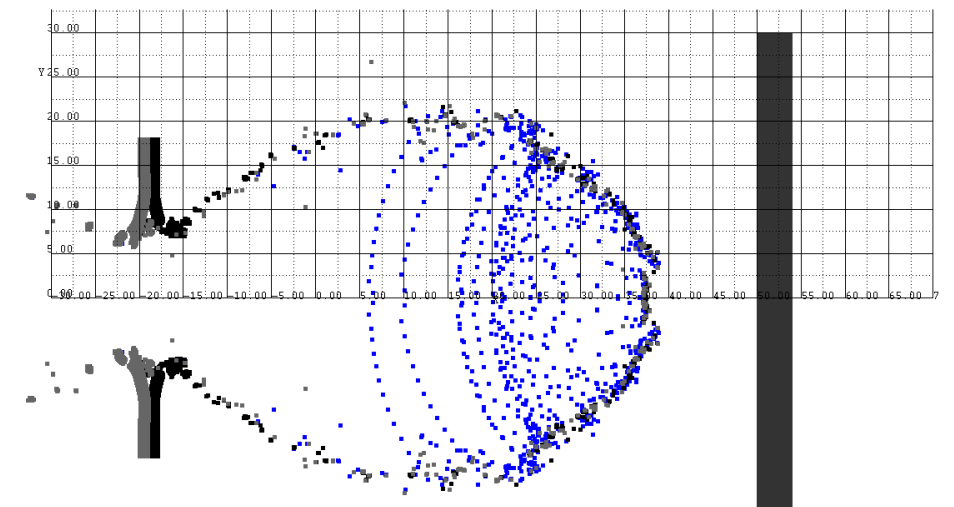
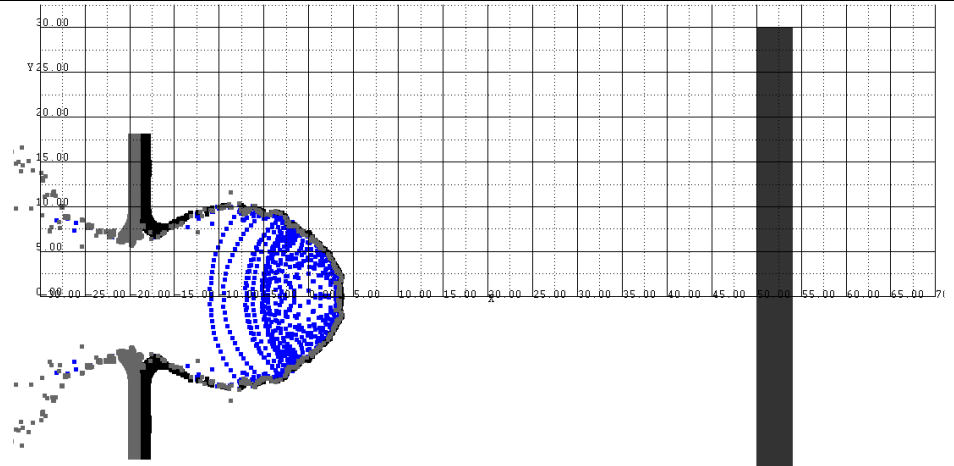


10 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai

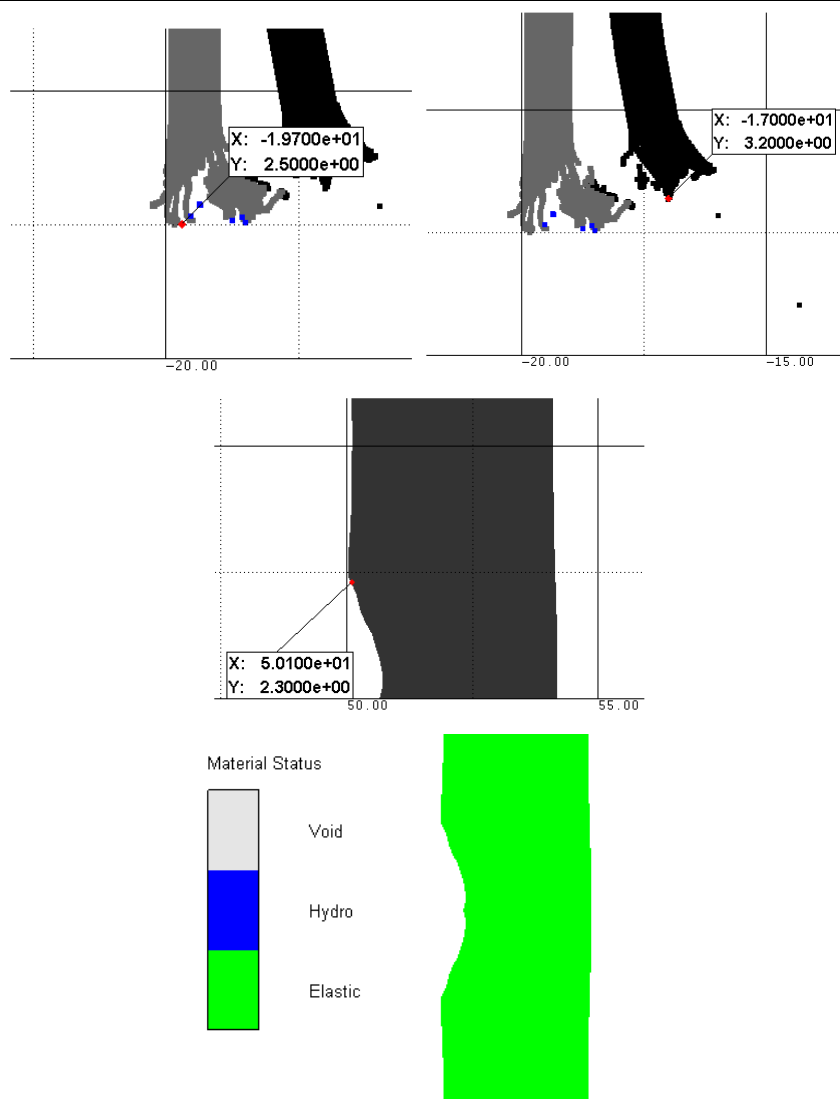
Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys priekinės plokštelės įtrūkimus ir jų matavimą. Taip pat parodyti galinės plokštelės įtrūkimai ir jos medžiagos būseną plokštelės centre. Pateikti tyrimo 6-70:05 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

Antroje lentelėje pateikti kūnų kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės titano sekcijos – žydros, priekinės plokštelės aliuminio sekcijos – žalios, galinės plokštelės – raudonos.

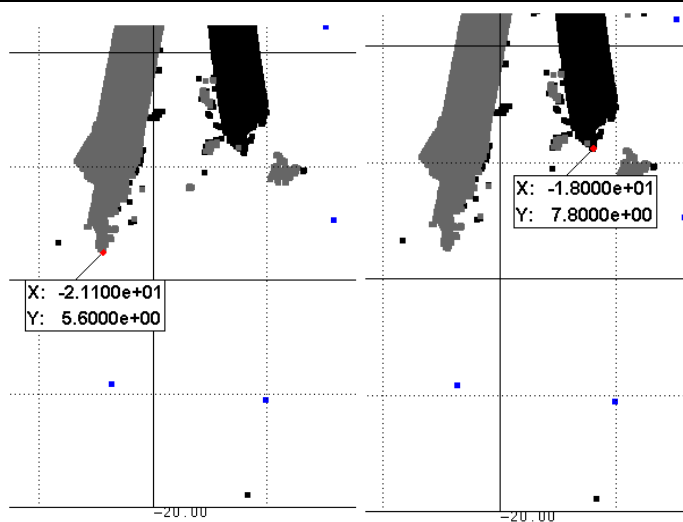
Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	

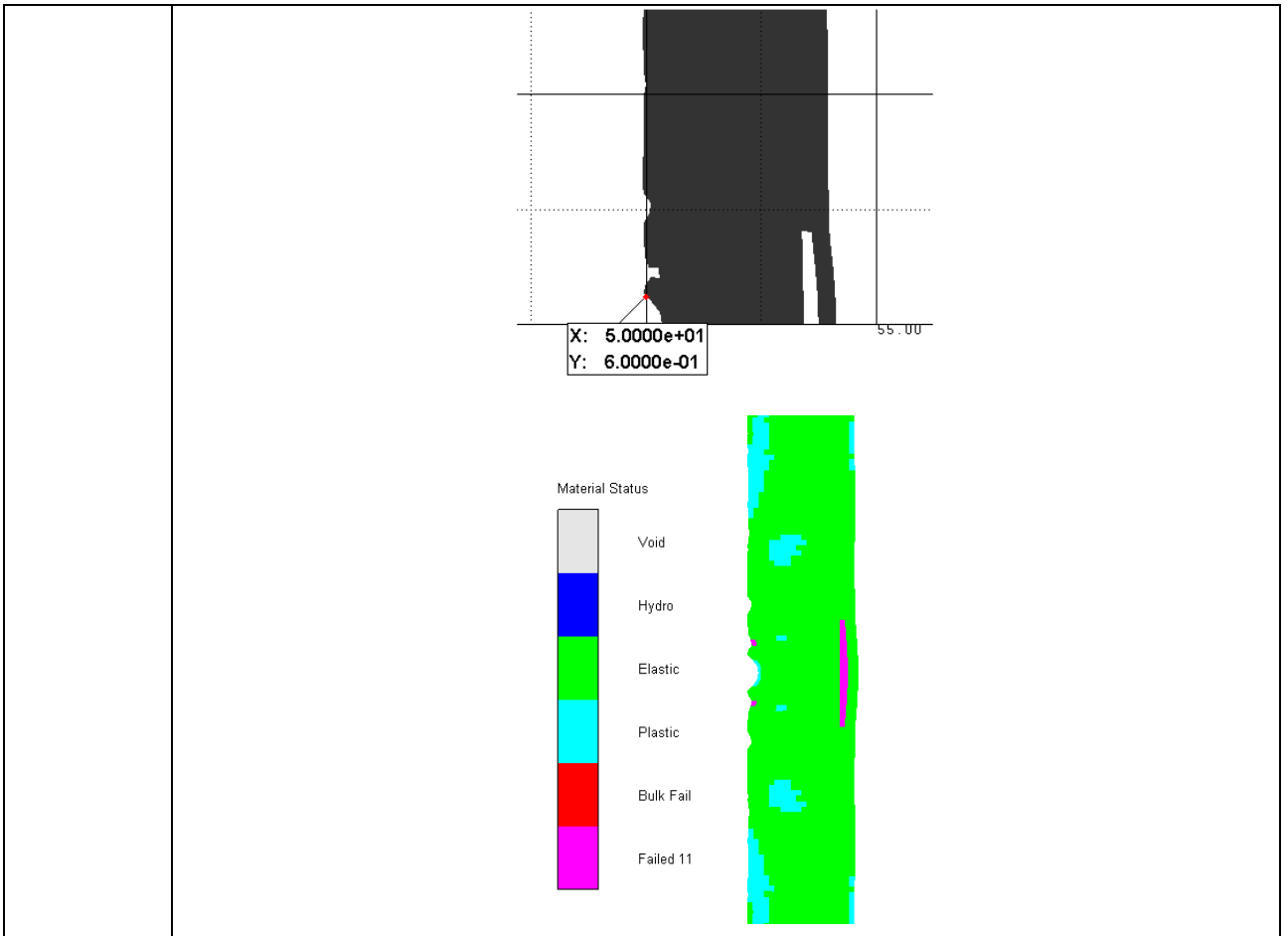


3-35:05

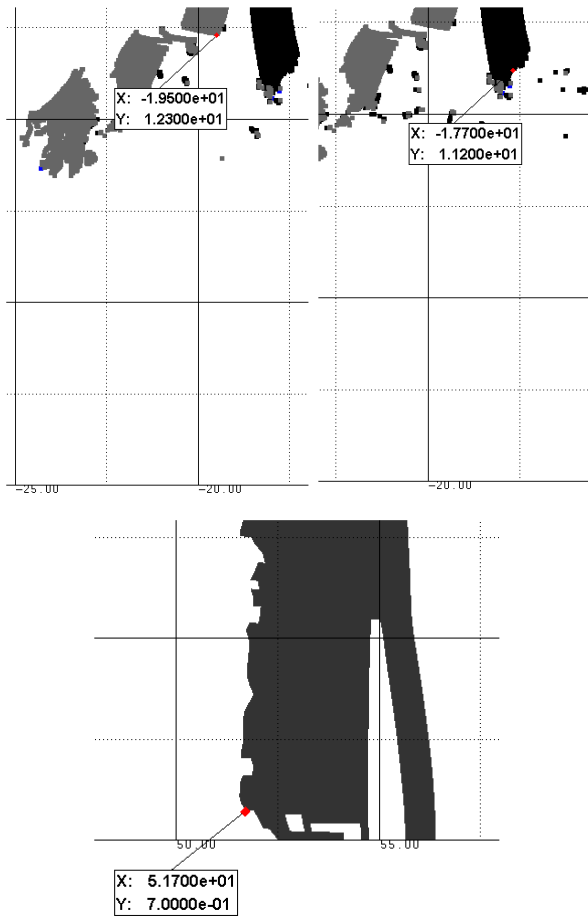


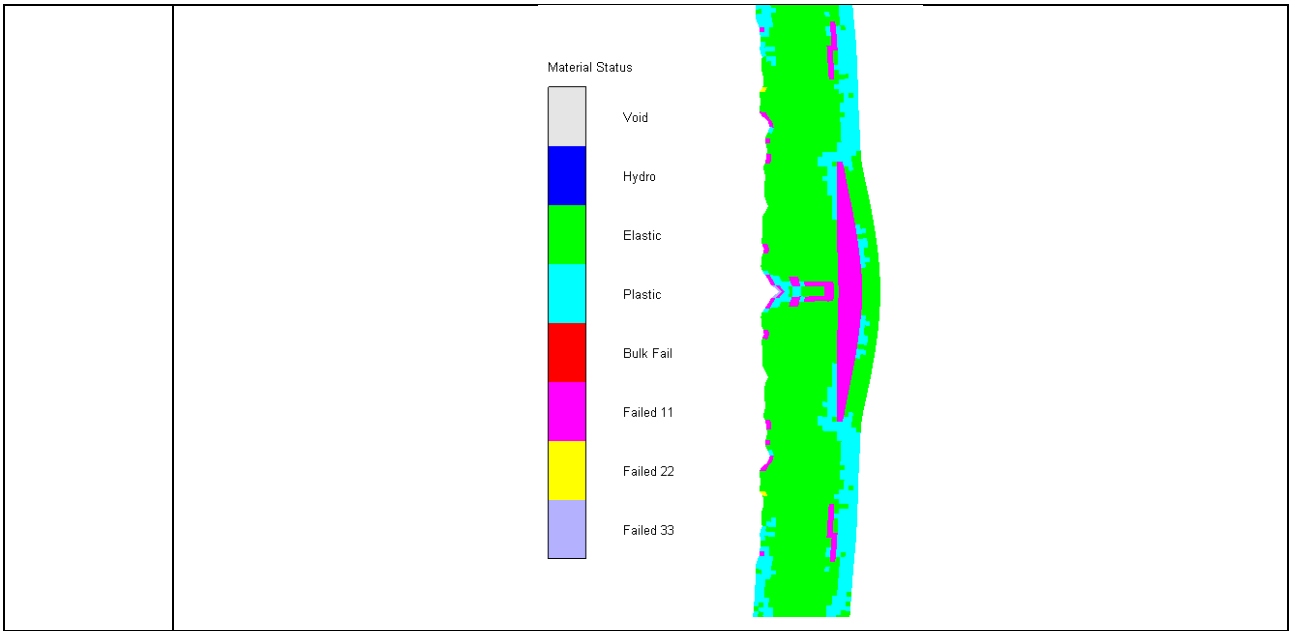
6-70:05



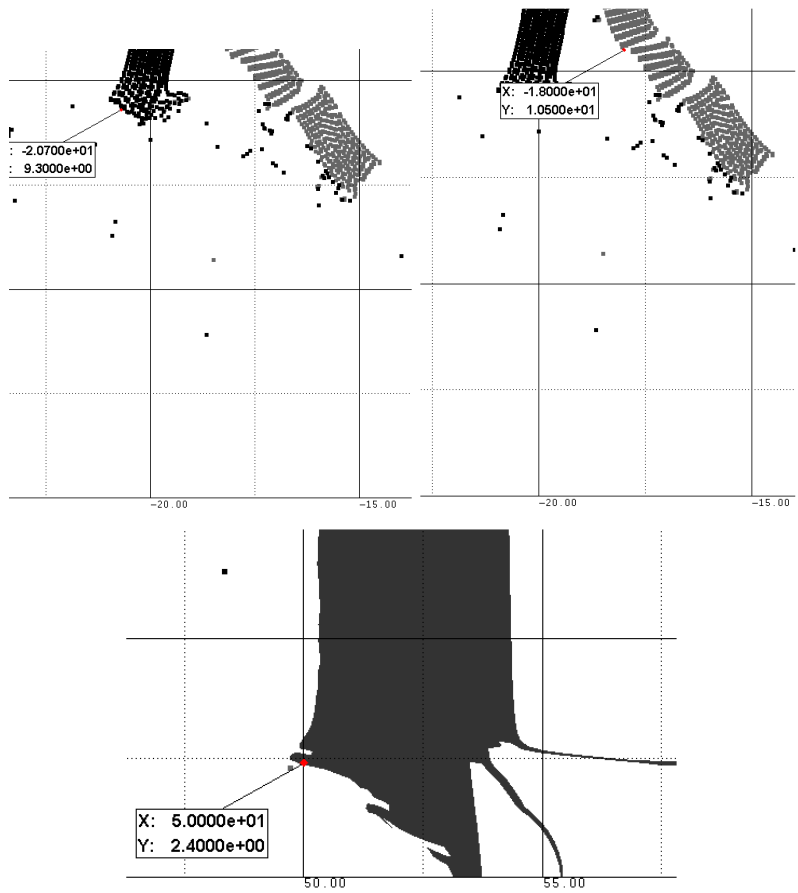


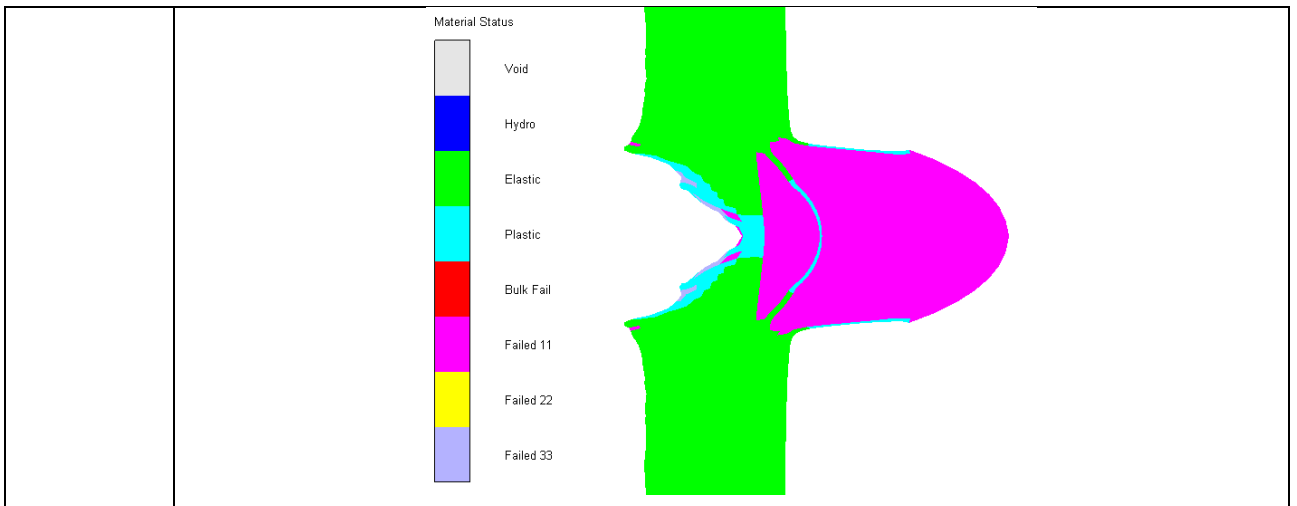
9-90:05





6-70:05
papildoma

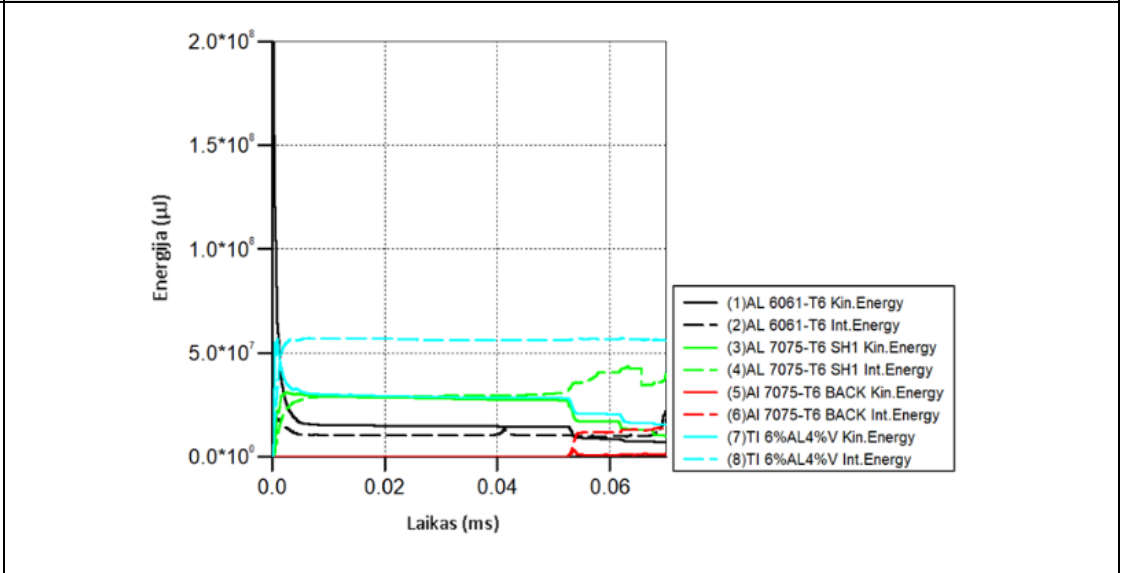




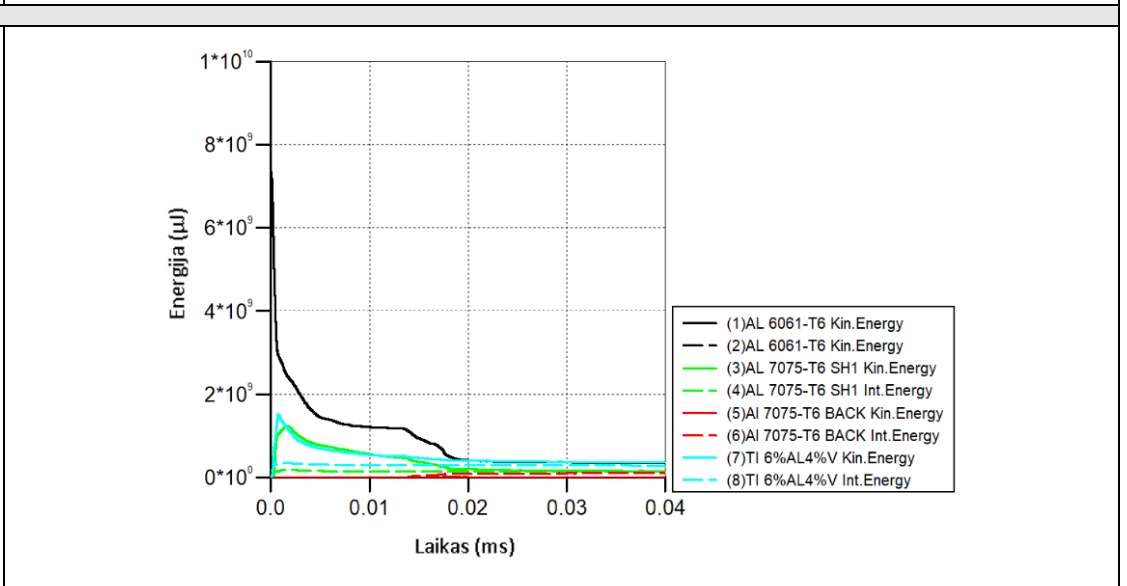
Priekinės plokštelės medžiagos koregavimo tyrimai: energija

Tyrimas: **Grafikai:**

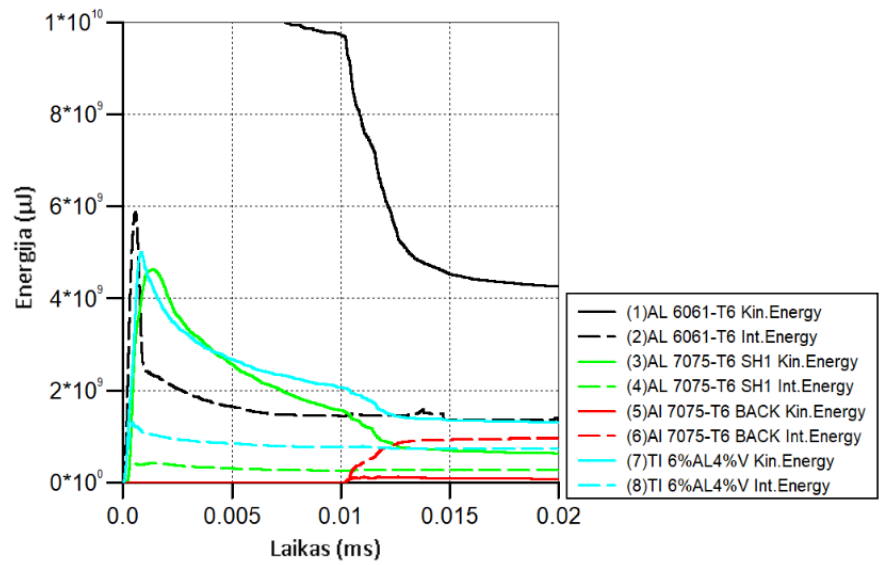
3-35:05



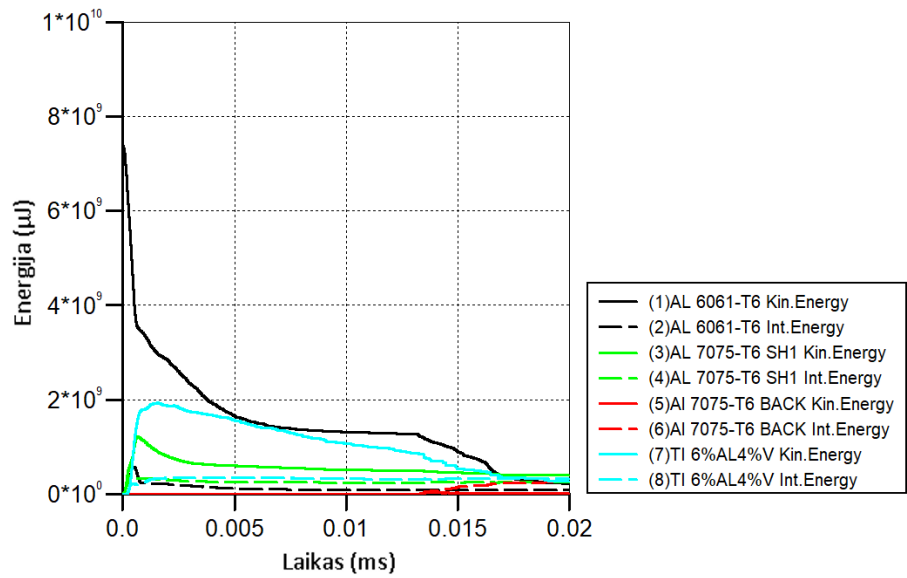
6-70:05



9-90:05



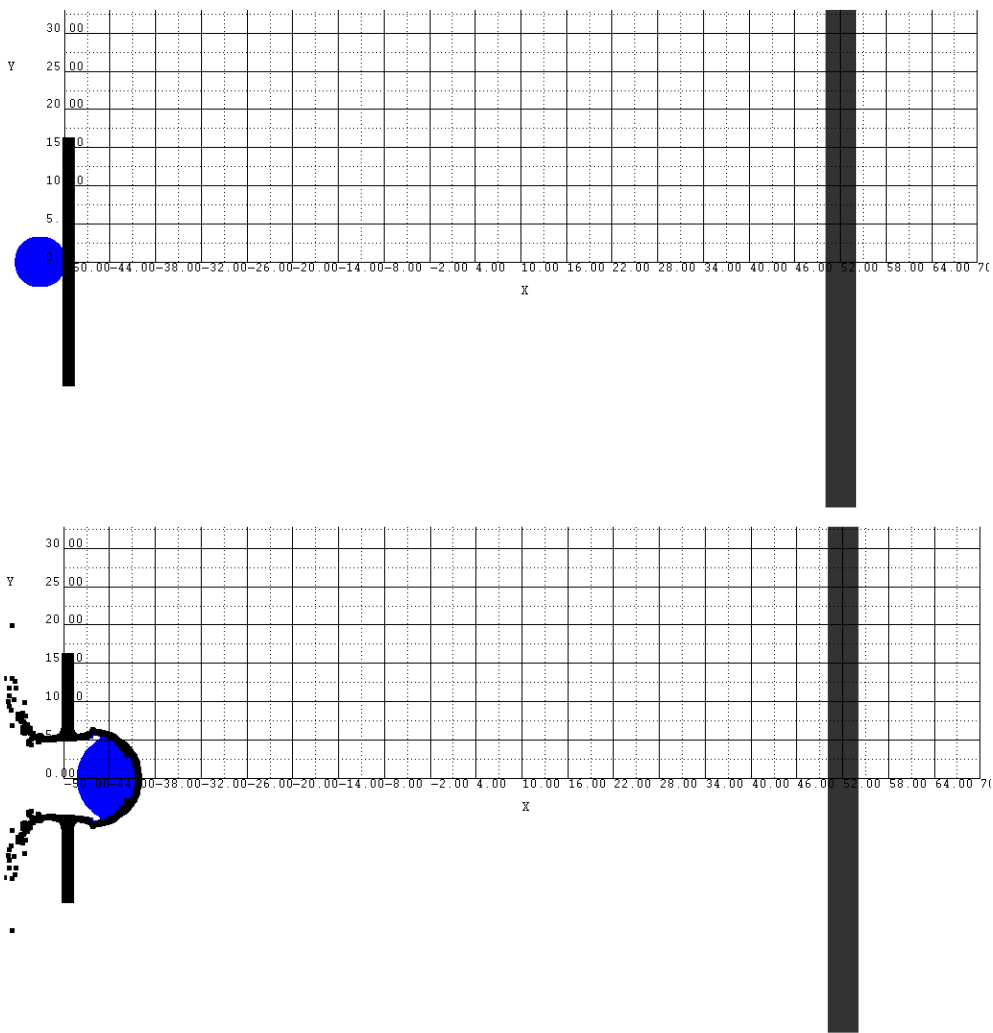
6-70:05
papildoma

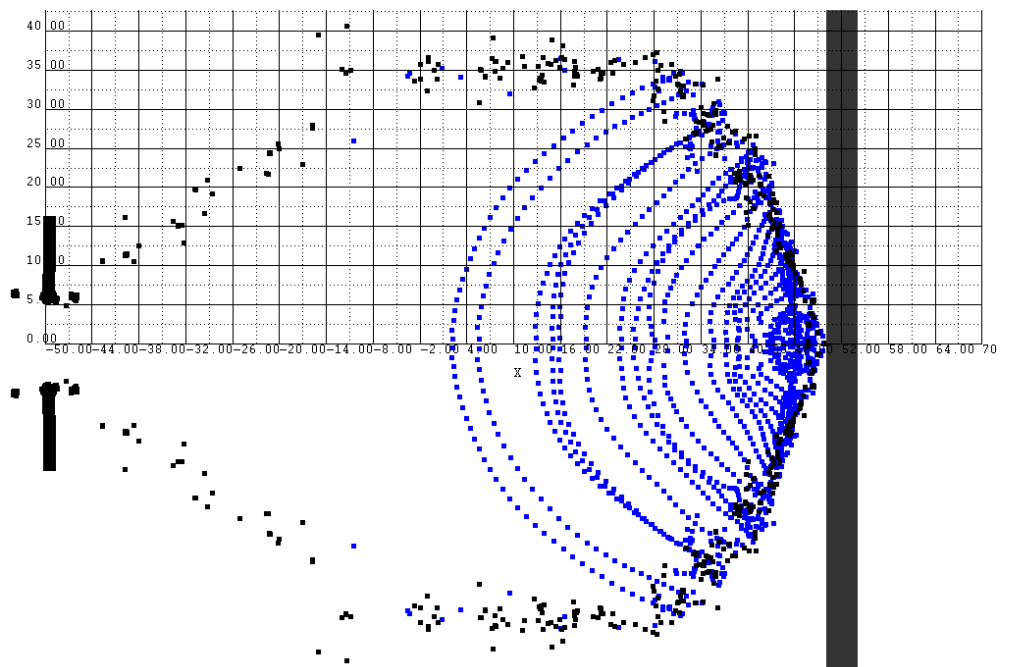
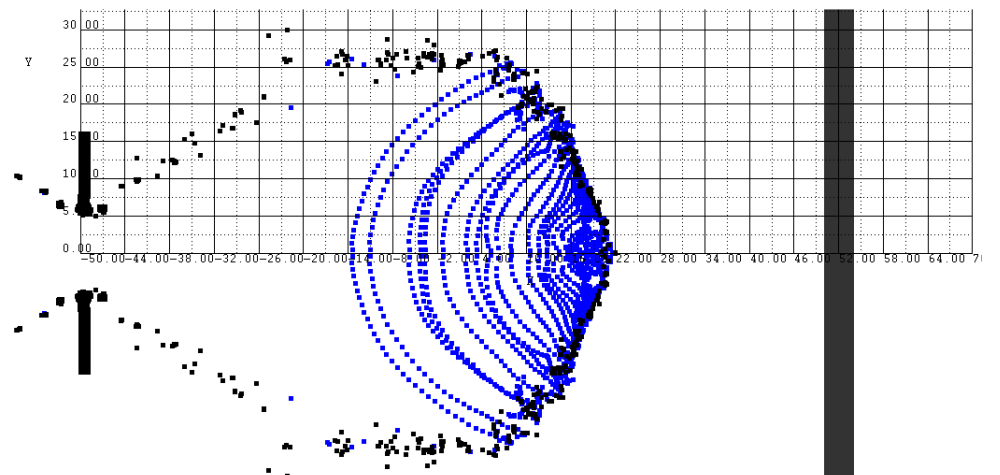
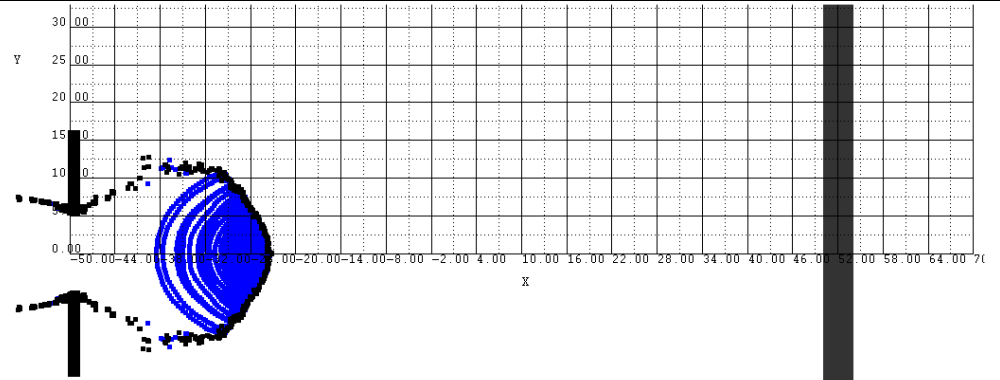


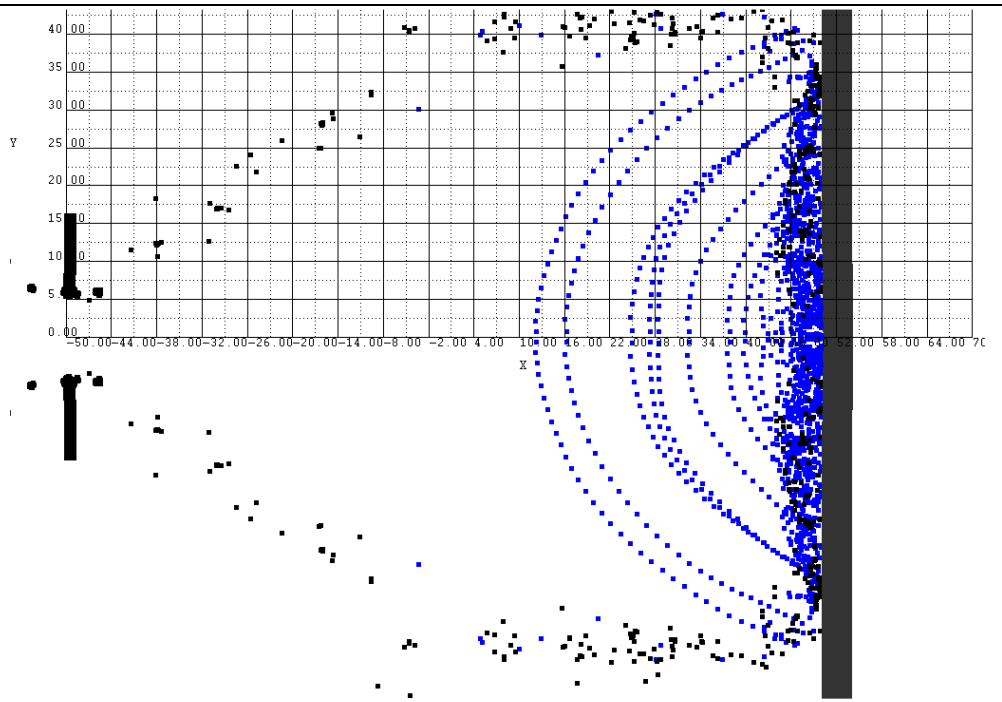
11 priedas. Skydo patobulinimas: priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimai

Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys galinės plokštelės perforaciją. Taip pat parodyta galinės plokštelės medžiagos būseną plokštelės centre. Priekinės plokštelės įtrūkimai identiški bazinio efektyvumo tyrimams (žr. 6 priedą). Pateikti tyrimo 6-70:06 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

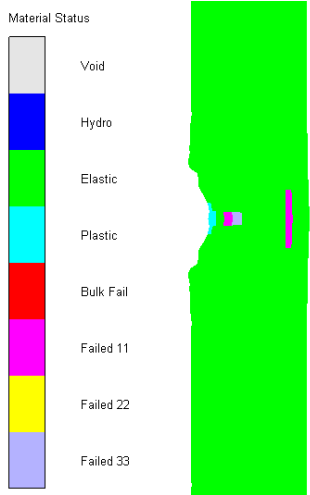
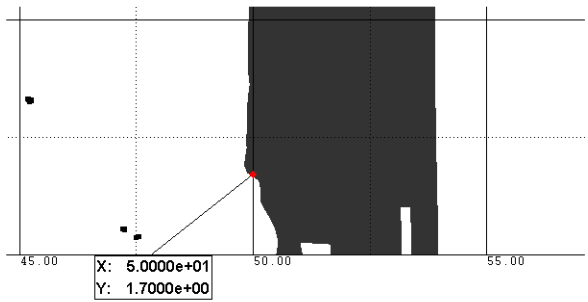
Antroje lentelėje pateikti kūnų kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės – žalios, galinės plokštelės – raudonos.

Priekinės plokštelės atstumo koregavimo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	

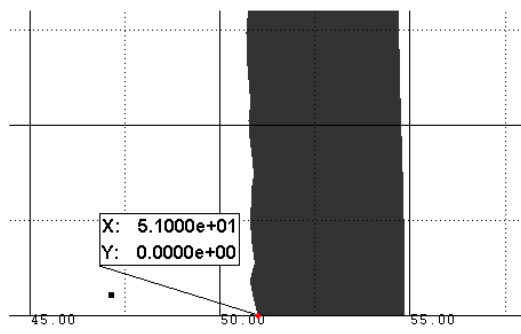




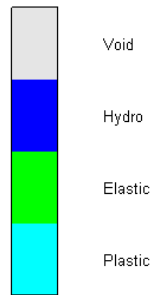
3-35:06



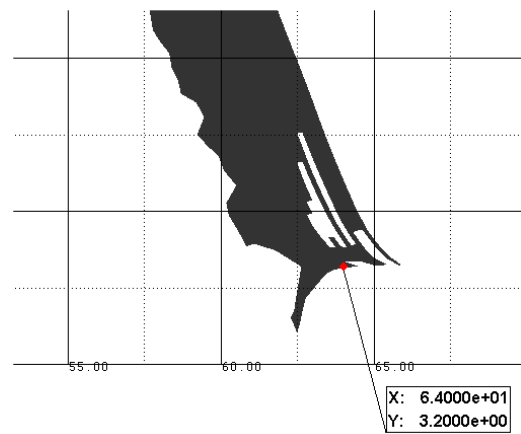
6-70:06

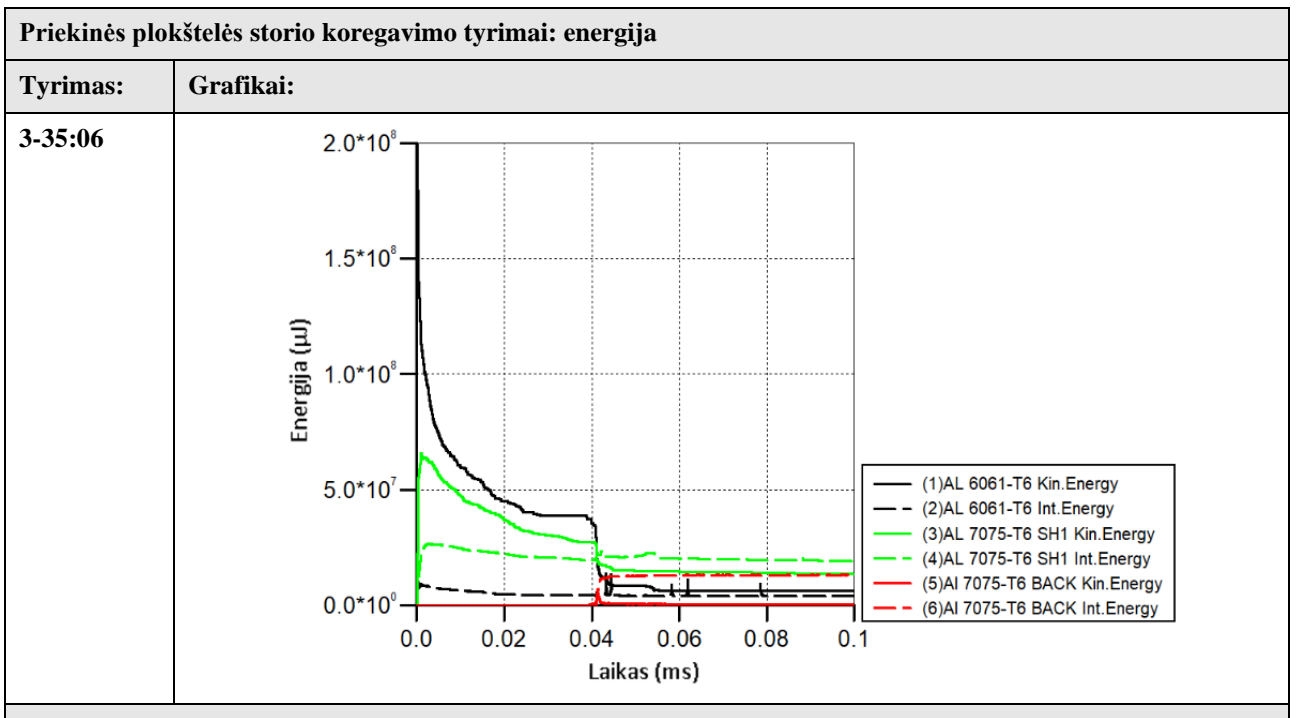
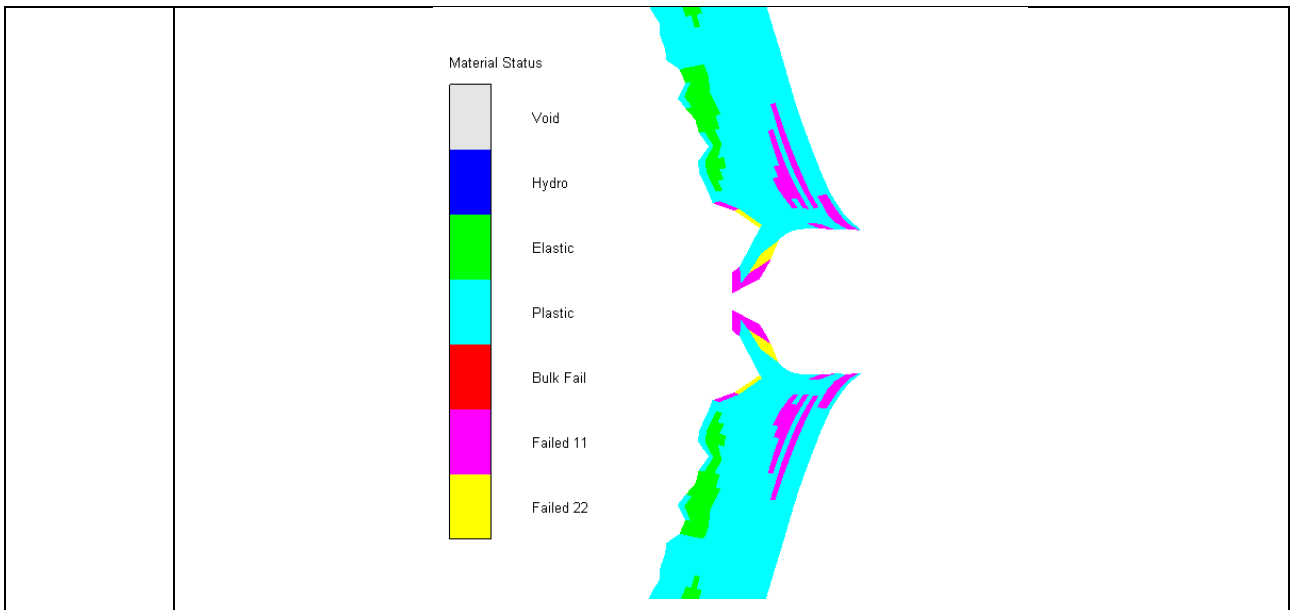


Material Status

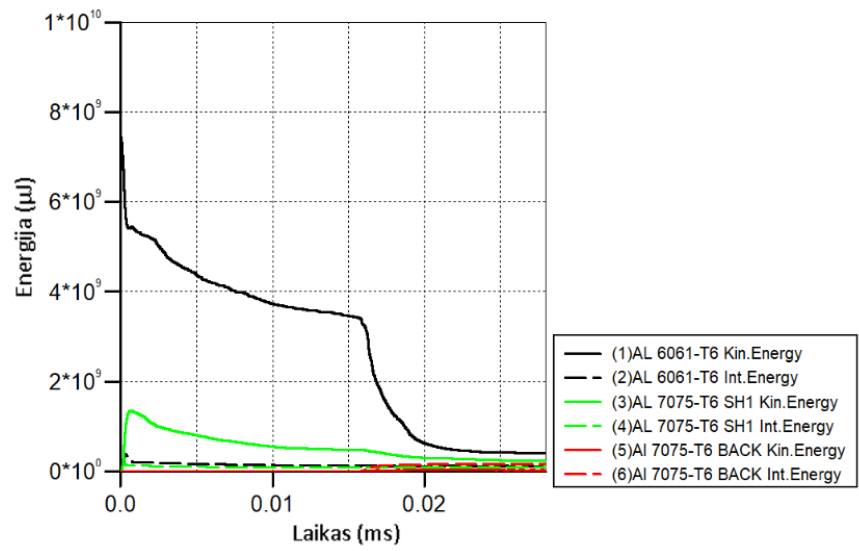


9-90:06

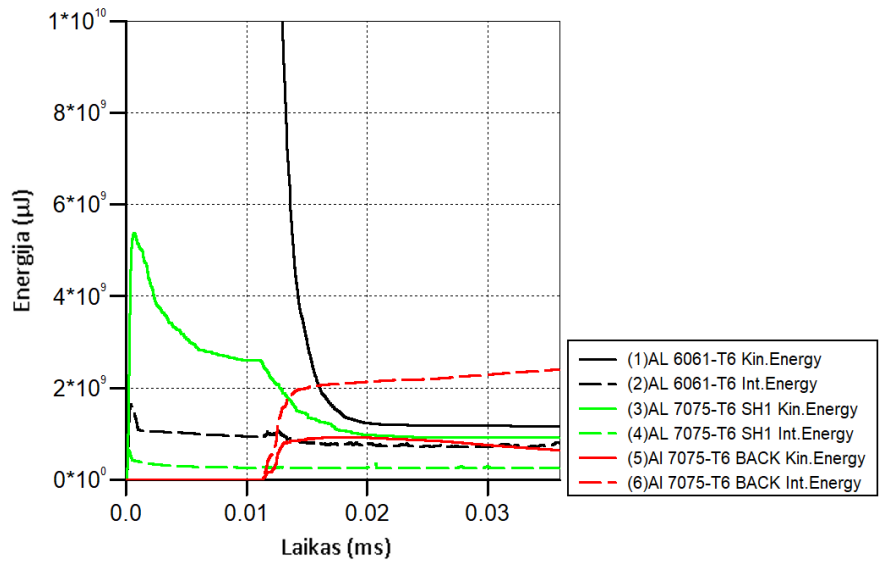




6-70:06



9-90:06



12 priedas. Skydų masių aptarimas

Darbe tiriamų skydų masės nepabrėžiamos, kadangi tai nėra pagrindinis darbo tikslas. Skydų masės įtrakuoja atraminių struktūrų standumą ir masę (tuo tarpu ir erdvėlaivio masę). Skydų masės prieaugio įtaka erdvėlaivio atraminėms konstrukcijoms reikalautų atskirų tyrimų (kuris galimai būtų apsunkintas informacijos, apie erdvėlaivio konstrukciją, konfidencialumu). Tolimesni darbai gali būti nutaikyti į skydų efektyvumo ir masės prieaugių santykį.

Atlikti skydų masės skaičiavimai. Masės normalizuojamos pagal bazinio skydo masę. Skydo masės apskaičiuotos programoje SolidWorks 2022, kur sukurtiems skydams taikomos atitinkamos medžiagos, o masės apskaičiuojamos pagal medžiagos tūri automatiškai. Skydų struktūros standartizuotos: 120 mm skersmens (cilindras), atitinkamo storio, atitinkamos medžiagos. Pakoreguotos struktūros ir kombinuotų patobulinimų skydams suteikiama cilindro išpjovimų formą prasideda centre ir kartojasi (su atitinkamais atstumais tarp išpjovimų) iki 5 mm atstumo nuo skydo krašto.

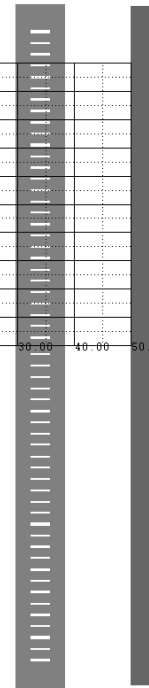
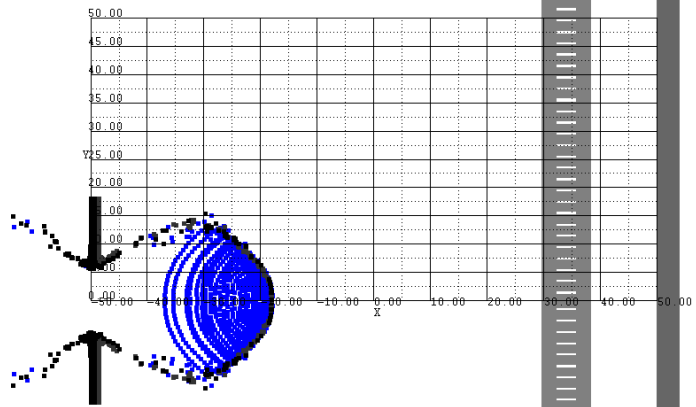
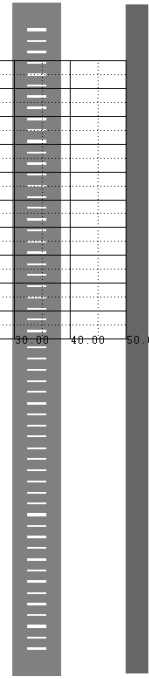
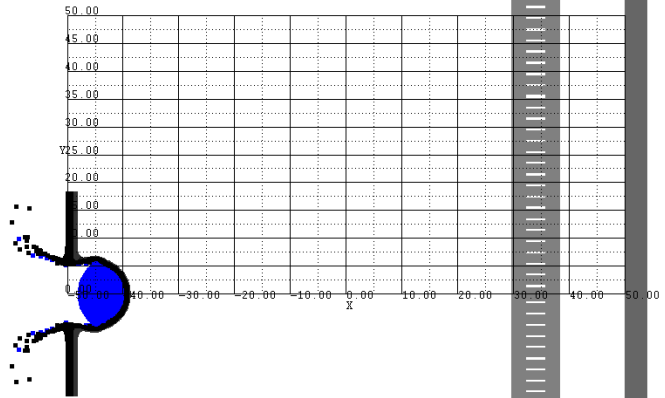
Skydas:	Masė:	Visa masė:	Normalizuota masė:
Bazinis skydas 01	Priekinė plokštelė – 31.78 g	31.78 g	1
Tarpinės plokštelės skydas 02	Priekinė plokštelė – 31.78 g Tarpinė plokštelė – 63.56 g	95.34 g	3
Pakoreguoto storio skydas 03	Priekinė plokštelė – 95.34 g	95.34 g	3
Pakoreguotos struktūros skydas 04	Priekinė plokštelė – 123.31 g	123.31 g	3.9
Pakoreguotos struktūros skydas 04 papildoma	Priekinė plokštelė – 251.46 g	251.46 g	7.9
Pakoreguotos medžiagos skydas 05	Priekinė plokštelė titano sekcija – 50.1 g Priekinė plokštelė aliuminio sekcija - 17.88 g	67.98 g	2.1
Kombinuotų patobulinimų skydas 07	Priekinė plokštelė – 57.31 g Tarpinė plokštelė – 197.9 g	254.61 g	8.0

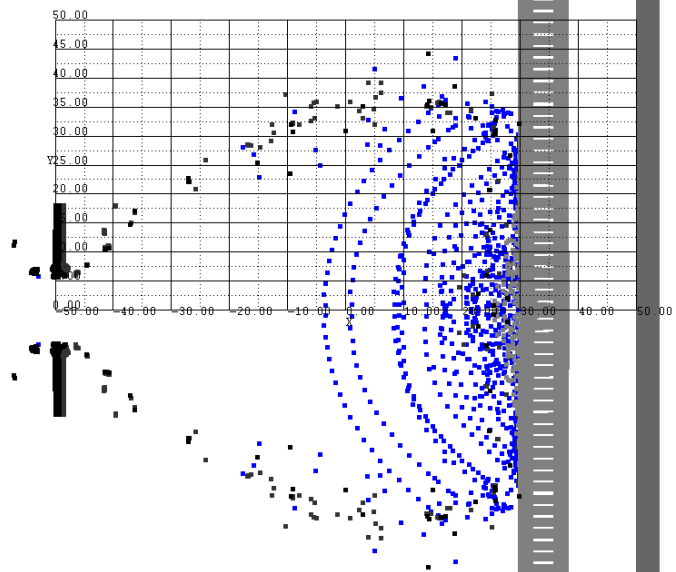
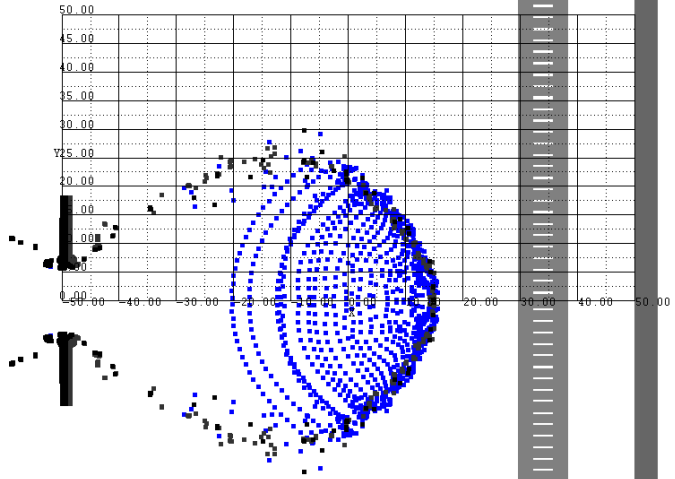
13 priedas. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai, 1 dalis

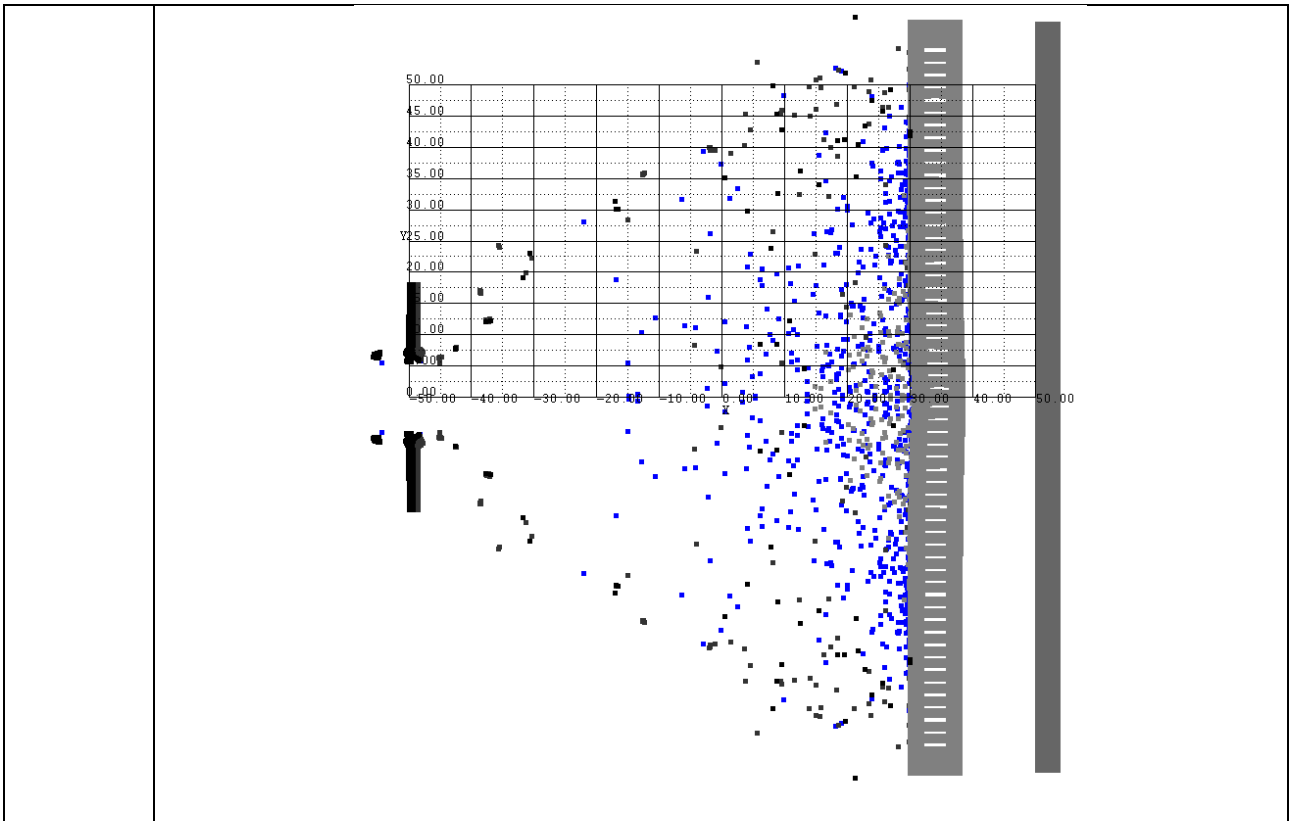
Pirmoje lentelėje pateikti tyrimų vaizdai, parodantys priekinės ir tarpinės plokštelių įtrūkimus ir jų matavimą. Galinės plokštelės parodytos tarpinės plokštelės vaizduose (jos nebuvo paveiktos). Taip pat parodyta tarpinės plokštelės medžiagos būseną visoje plokštelėje ir plokštelės centre. Pateikti tyrimo 6-70:07 bendri viso modelio erdvės vaizdai.

Antroje lentelėje pateikti kūnų kinetinės (pilnas) ir vidinės (brūkšniuotas) energijų priklausomybės nuo laiko grafikai. Smūgiuojančios dalelės grafikas juodos spalvos, priekinės plokštelės titano sekcijos – žydros, priekinės plokštelės aliuminio sekcijos – žalios, tarpinės plokštelės – geltonos, galinės plokštelės – raudonos.

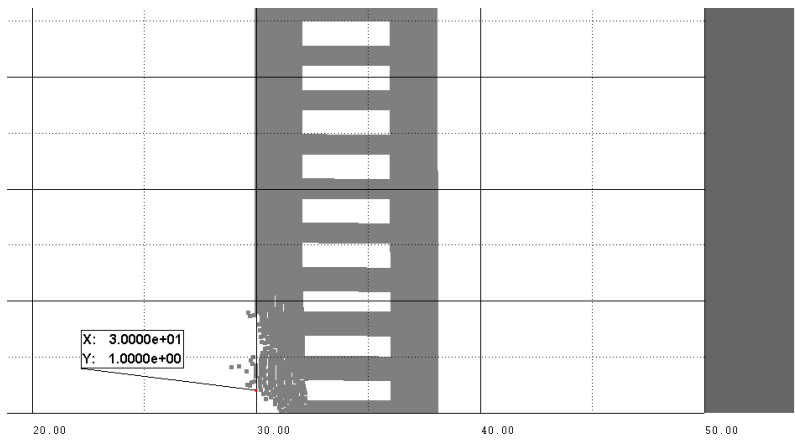
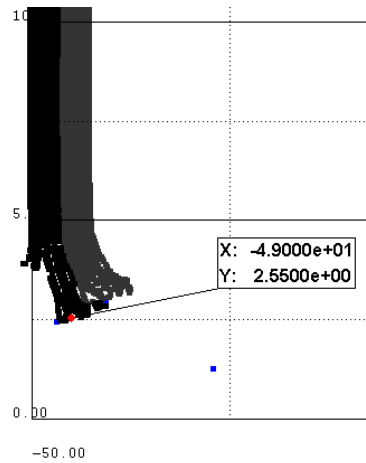
Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai: įtrūkimai	
Tyrimas:	Vaizdai:
Bendri vaizdai	

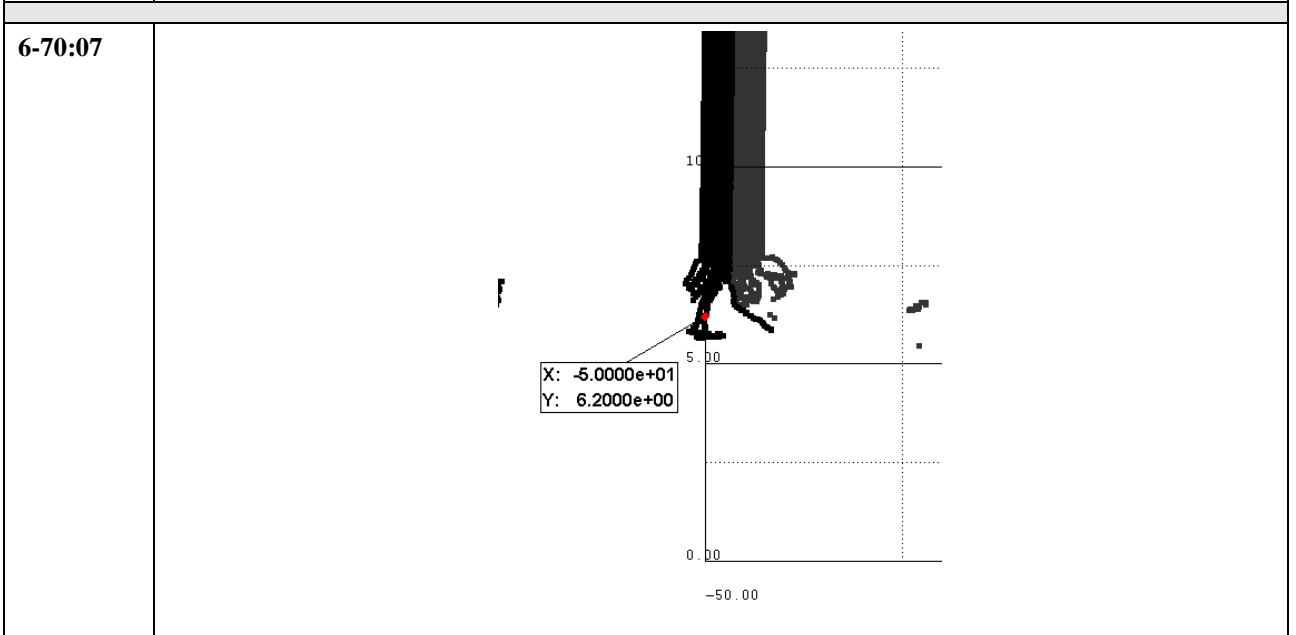
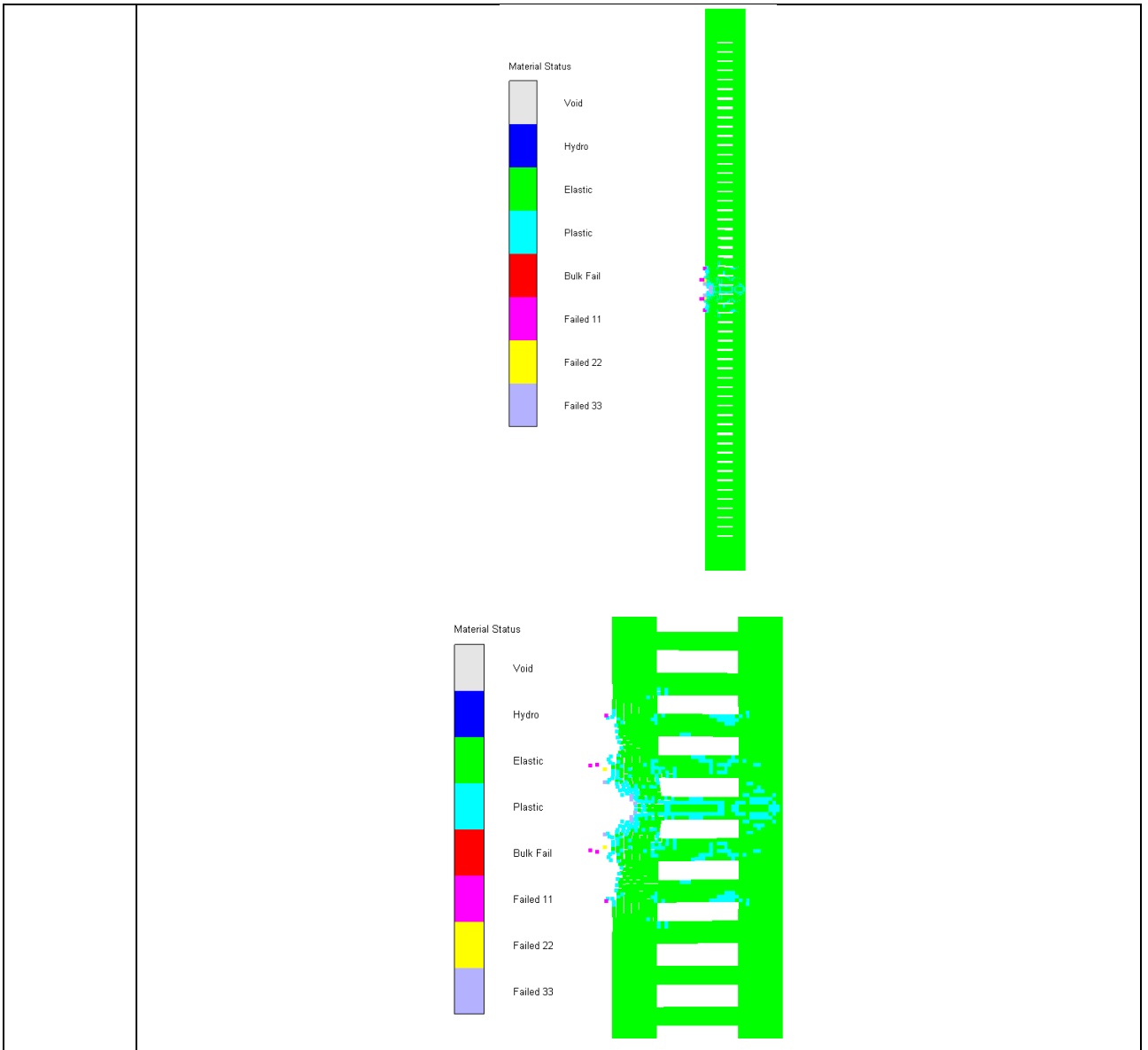


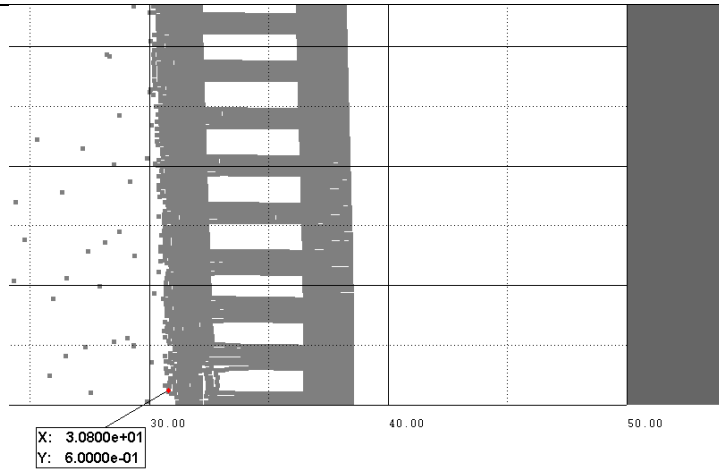




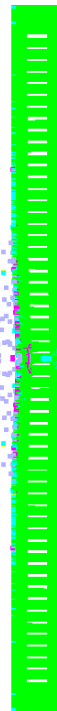
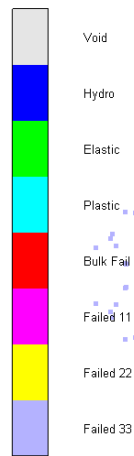
3-35:07



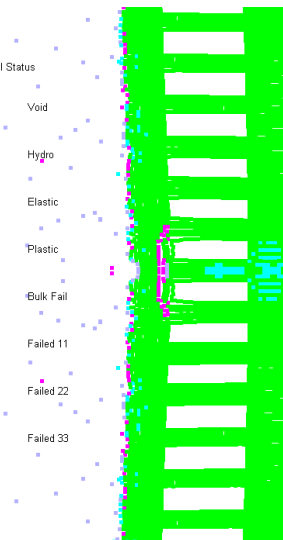
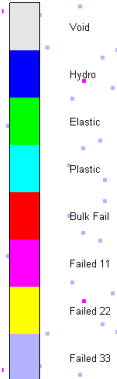




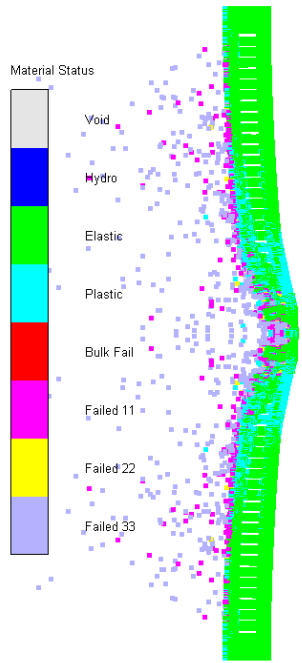
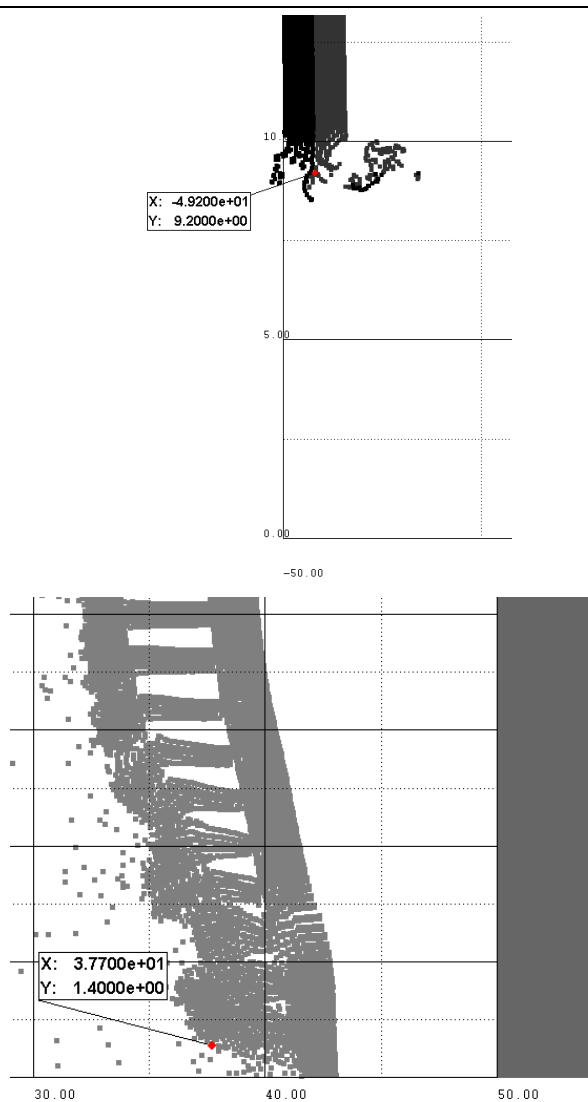
Material Status

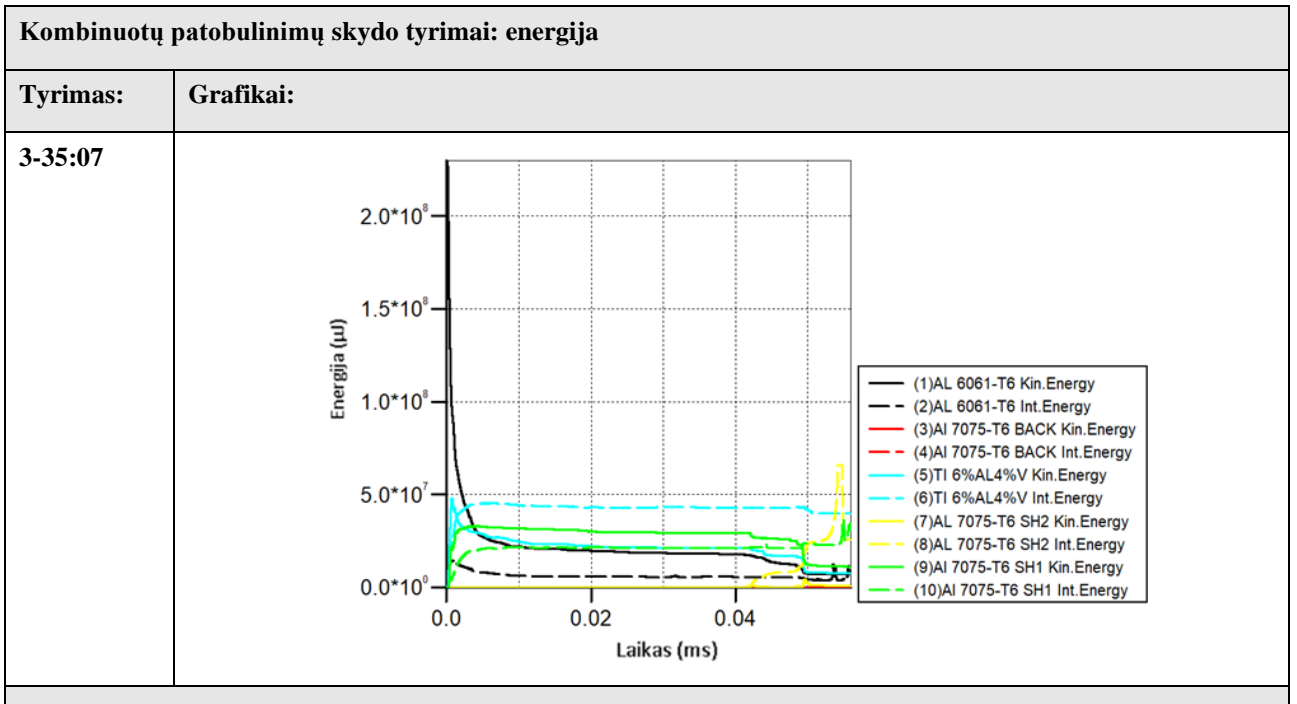
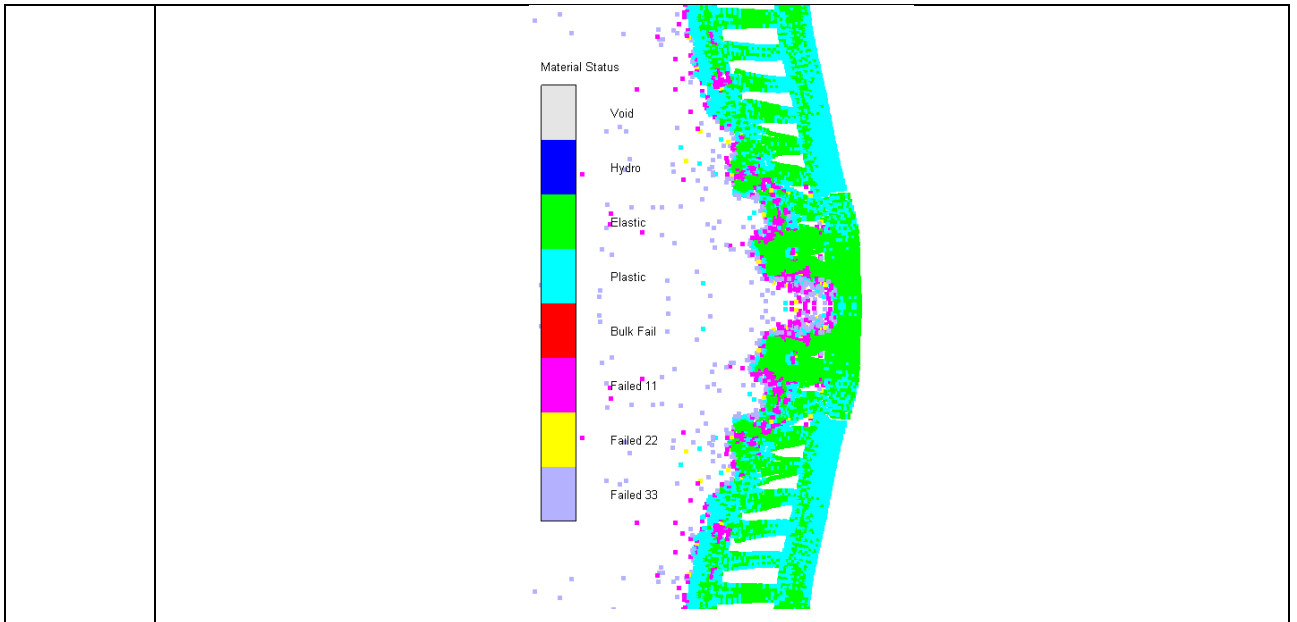


Material Status

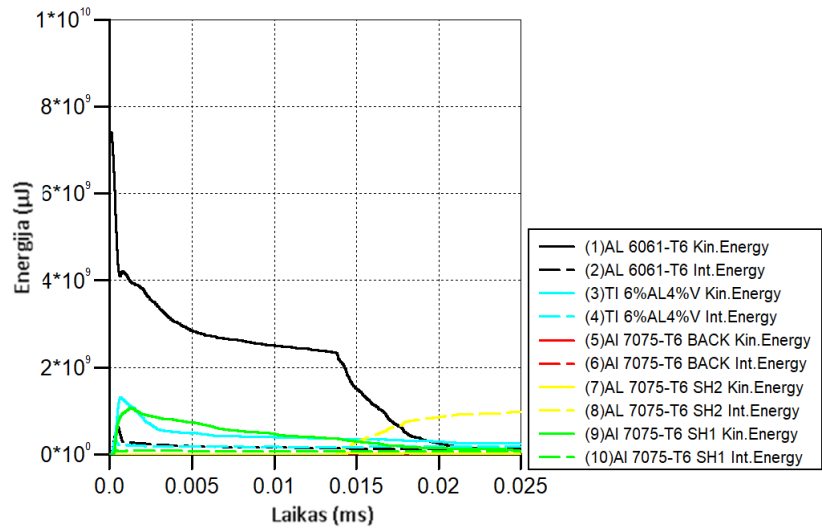


9-90:07

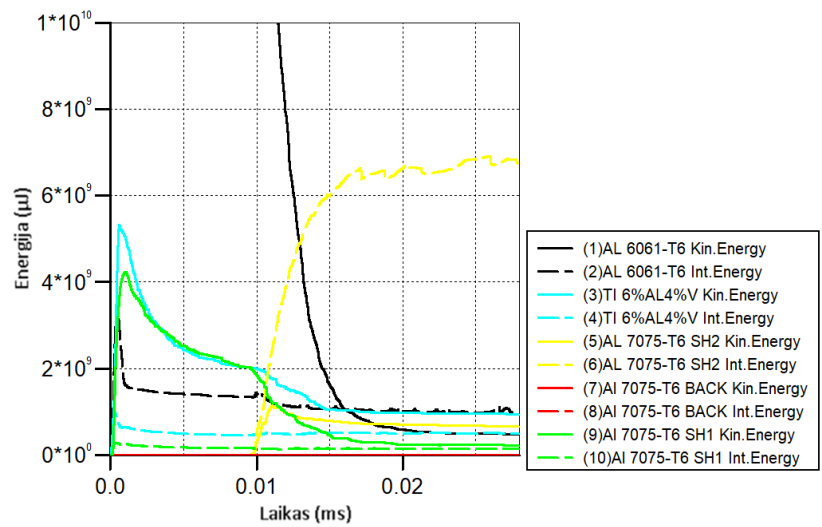




6-70:07



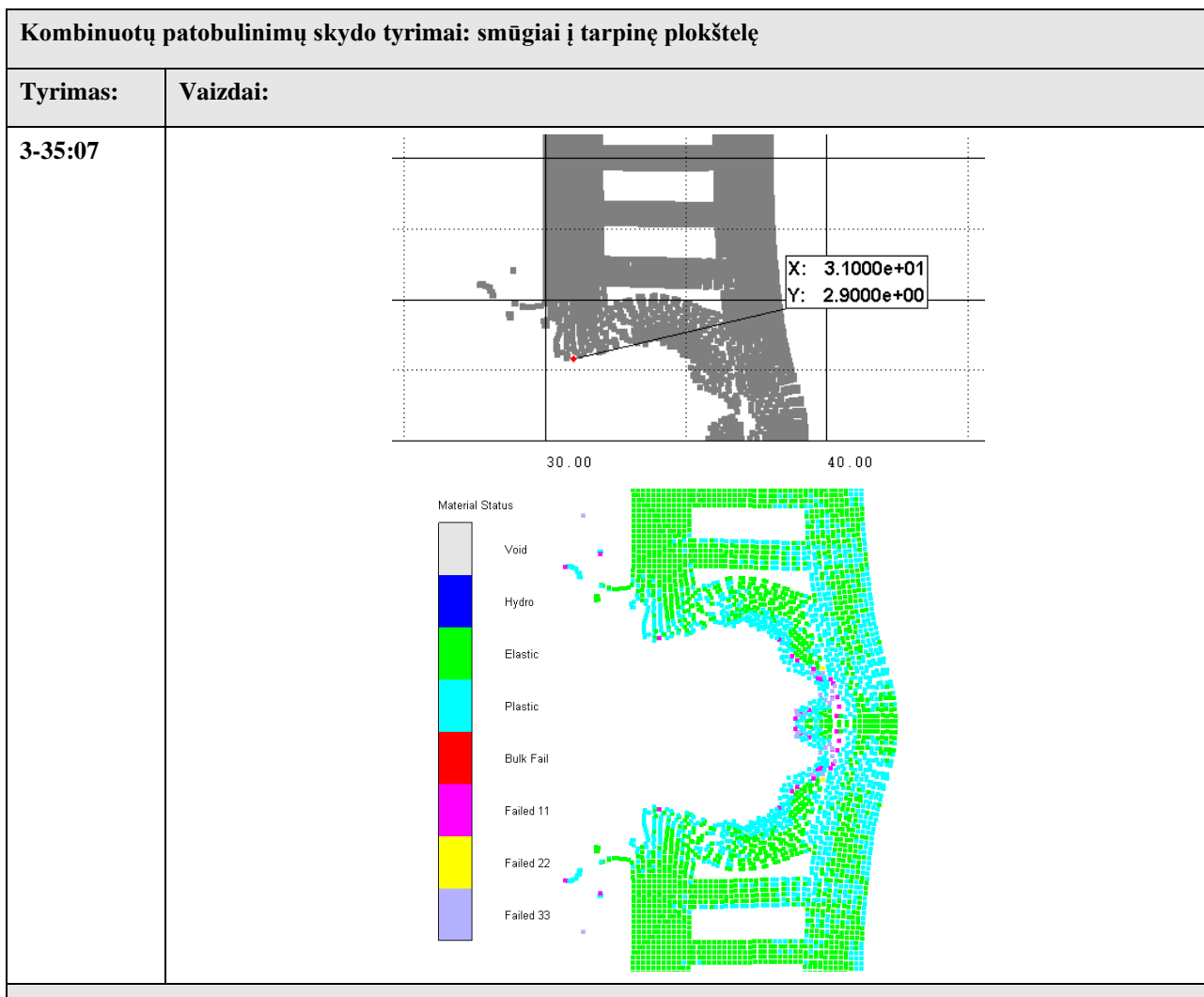
9-90:07



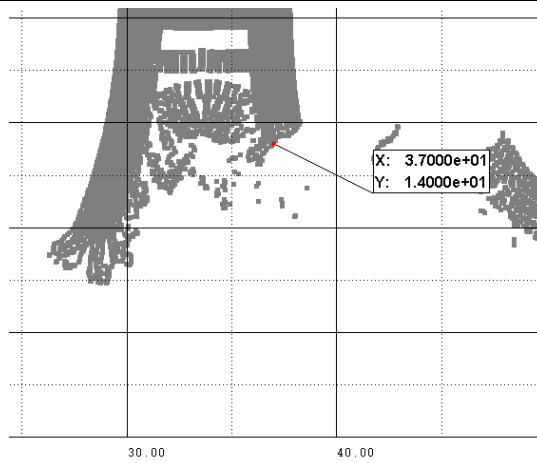
14 priedas. Kombinuotų patobulinimų skydo tyrimai, 2 dalis

Siekiant nustatyti kombinuotų patobulinimų skydo tarpinės plokštelės efektyvumą, į ją smūgiuojama tyrimų 3-35, 6-70, 9-90 dalelėmis, joms ne smūgiuojant iš pradžių priekinę plokštelę - tiriama plokštelė, neturinti įtrūkimų nuo pradinio smūgio. Būtina pabrėžti, kad skydas buvo sukurtas naudojimui su priekine plokštele.

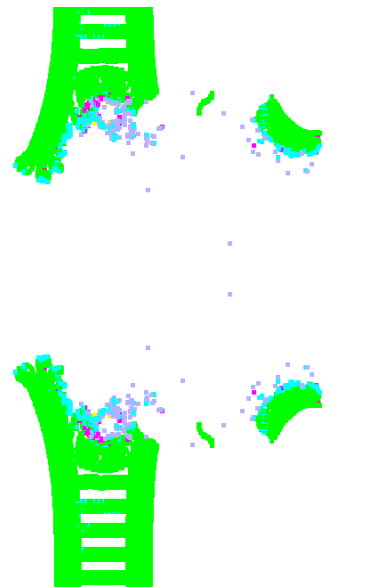
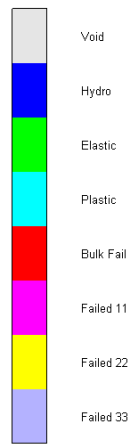
Taip pat parodytas dalelių debesėlio formavimas, kai smūgiuojama į užpildo akutę, lyginant su smūgiu į užpildo cilindro centrą. Pabrėžiama, kad po smūgio į akutę tyrime 3-35 skydas patyrė pilną perforaciją, lyginant su smūgio į cilindro išpjovimo centrą daline perforacija.



6-70:07



Material Status



9-90:07

