



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių
charakteristikų tyrimas**
Baigiamasis magistro projektas

Gvidas Milkintas
Projekto autorius

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Gvidas Milkintas

Projekto autorius

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius

Vadovas

Doc. Robertas Keršys

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Gvidas Milkintas

Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių charakteristikų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gvidas Milkintas, baigiamasis projektas tema „Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių charakteristikų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) *Gvidas, Milkintas*

1. Baigiamojo projekto tema:

Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių charakteristikų tyrimas.

Investigation of the ballistic characteristics of a military armoured vehicle.

2. Projekto tikslas: Nustatyti negamyklinių šarvų nuo mažo kalibro šaulių ginklų kriterijus karinėms transporto priemonėms iki 5 t.

3. Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti karinių šarvuotų transporto priemonių naudojamus šarvus ir jų balistines charakteristikas.
2. Išanalizuoti karinių šarvuotų transporto priemonių konstrukcijas.
3. Atlikti sviedinio skverbimosi į nuožulnius šarvus tyrimą naudojant ANSYS programinę įrangą.
4. Pritaikyti atlikto tyrimo rezultatus šarvavimo kriterijų nustatymui.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Darbą sudaro įvadas, trys skyriai, apibendrinimas, išvados, naudotos literatūros sąrašas, priedai. Baigiamojo projekto apimtis – 93 puslapis, jame yra 6 lentelės ir 69 paveikslai.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius

Gvidas Milkintas

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programų vadovas

prof. Artūras Keršys

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Autorius Milkintas, Gvidas. Karinės šarvuotos transporto priemonės balistinių charakteristikų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vaidas Lukoševičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: galinė balistika, sviedinys, sviedinio skverbimasis, šarvai.

Kaunas, 2020. 93 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte tiriama medžiagų, naudojamų karinių transporto priemonių šarvavimui, savybės ir jų įtaka šarvavimo sistemoms jas veikiant sviedinio kinetinei energijai. Taip pat darbe atliekama karinių transporto priemonių konstrukcijų, jų šarvavimo būdų ir galinės balistikos analizė.

Projekte tiriama mažo kalibro šaulių ginklų sviedinio skverbimosi į karinių transporto priemonių šarvus charakteristikos. Atliekant sviedinio skverbimosi tyrimą naudojamas skaitinis modeliavimas ANSYS programinėje įrangoje. Tiriama 3 objektai: 7,62 mm kalibro plieninio apvalkalo sviedinio skverbimasis į 4 mm storio įrankinio plieno S-7 plokštę, esant sviedinio atakos kampams 20°, 30°, 40° ir 50°; 7,62 mm kalibro plieninio apvalkalo sviedinio skverbimasis į 4 mm storio aliuminio lydinio 7039 plokštę, esant sviedinio atakos kampams 50°, 60° ir 70° ir 7,62 mm kalibro plieninio apvalkalo sviedinio skverbimasis į dvi 2 mm storio įrankinio plieno S-7 plokštes, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas, esant sviedinio atakos kampams 30° ir 40°. Apart tyriamiems objektams naudojamų skirtingų taikinio plokščių išmatavimų, medžiagų ir sviedinio atakos kampų, tiriamų objektų atliekami bandymai modeliuojami vienodomis sąlygomis: pradinis sviedinio greitis 715 m/s, kuris sukasi apie savo ašį 18850 rad/s (3000 aps/s); tyrimo aplinkos temperatūra 19,85 °C.

Tiriamų objektų gauti rezultatai pateikti vaizdiniuose, kai sviedinio skriejimo laikas nuo jo išlėkimo iš ginklo vamzdžio pradžios pasiekia 29 μs, 52 μs, 76 μs ir 123 μs. Taip pat pateikti grafiniai rezultatai: sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko; sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko ir taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko.

Author Milkintas, Gvidas. Investigation of the ballistic characteristics of a military armoured vehicle. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vaidas Lukoševičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: rear ballistic, projectile, projectile penetration, armour.

Kaunas, 2020. 93 pages.

Summary

Master final degree project analyzes characteristics of materials used in the armour of military vehicles and their influence of armour systems on their exposure to projectile kinetic energy. Also this project analyzes military vehicle constructions, their armouring methods and rear ballistics is performed in this work

This analyzes characteristics of small arms projectile penetration into military vehicle armour. Numerical modeling in ANSYS software is used for the projectile penetration analysis. 3 objects are studied: 7,62 mm calibre full metal jacket projectile penetration to 4 mm thick tool steel S-7 plate, when projectile trajectory is 20°, 30°, 40° and 50°; 7,62 mm calibre full metal jacket projectile penetration to 4 mm thick aluminum 7039 alloy plate, when projectile trajectory is 50°, 60° and 70° and 7,62 mm calibre full metal jacket projectile penetration to two 2 mm thick tool steel S-7 plates, with gap of 3 mm in between, when projectile trajectory is 30° and 40°. Besides different sizes objects, their materials and projectile trajectories that are used in analyzes, objects that are analyzed are modeled in equal conditions: primary projectile speed is 715 m/s, which also rotates around its axis at 18850 rad/s (3000 cps); analyzes environment temperature is 19.85 °C.

The results of objects analyzes is projected in images, when projectiles flying time from when it's fired reaches 29 μs, 76 μs and 123 μs. Also listed are graphical results: projectile speed dependence from time; projectile energy dependence from time and targets plasticity deformation dependence from time.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	13
1. Analizė.....	14
1.1. Šarvuoti naudojami medžiagos	14
1.1.1. Medžiagų struktūra ir savybės.....	14
1.1.2. Metalai.....	16
1.1.3. Pluoštiniai audiniai	21
1.1.4. Keramika ir stiklas.....	23
1.2. Šarvų tipai.....	26
1.3. Šarvavimo lygiai.....	31
1.4. Karinių transporto priemonių konstrukcijos.....	32
1.4.1. Lengvieji visureigiai ir sunkvežimiai iki 5t.....	32
1.4.2. Spec. paskirties transporto priemonės	33
1.4.3. Taktinės transporto priemonės	33
1.4.4. Transporteriai	34
1.4.5. PKM	35
1.4.6. Tankai ir haubicos	36
1.5. Balistika.....	37
1.5.1. Vidinė balistika.....	37
1.5.2. Išorinė balistika	38
1.5.3. Galinė balistika.....	39
1.6. Šaulių ginklų šaudmenys ir jų klasifikavimas	41
1.6.1. Šaudmens sandara	43
1.6.2. Sviedinio apvalkalo poveikis įsiskverbimo metu	44
1.7. Balistiniai tyrimai	45
2. Sviedinio skverbimosi į nuožulnius šarvus tyrimas	50
2.1. Tiriamų objektų sąlygos ir eiga	50
3. Sviedinio skverbimosi į nuožulnius taikinius tyrimo rezultatai ir jų pritaikymas.....	54
Apibendrinimas	63
Išvados.....	64
Literatūros sąrašas	65
Priedai.....	67
1 Priedas. Pirmo tiriamo objekto grafiniai rezultatai.....	67
2 Priedas. Antro tiriamo objekto grafiniai rezultatai	79
3 Priedas. Trečio tiriamo objekto grafiniai rezultatai.....	88

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindinių, šarvavimui naudojamų, metalo lydinių charakteristikos	20
2 lentelė. Pagrindinių šarvavimui naudojamų, pluoštinių audinių charakteristikos.....	23
2 lentelė. Pagrindinių, šarvavimui naudojamų, keramikos ir stiklo kompozitų charakteristikos	26
4 lentelė. Karinių transporto priemonių šarvavimo lygiai ir jų sąlygos	31
5 lentelė. Sviedinio skverbimosi ribos tyrimo rezultatai.....	47
6 lentelė. Tiriamų objektų medžiagų reikšmės pagal Johnson-Cook medžiagos plastiškumo ir lūžio modelius	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Metalų aušinimo (kristalizacijos) kreivė	15
2 pav. Metalų gardelės	15
3 pav. Pagrindiniai šarvavimui naudojami metalai ir jų apdirbimo būdai	17
4 pav. Skirtingo kietumo plieno plokščių valcavimas	18
5 pav. Perforuota plieno plokštė, su tarpu pritvirtinta prie pagrindinio šarvo	18
6 pav. Perforuota plieno plokštė keičianti sviedinio skriejimo trajektoriją ir nukreipiantį sviedinį nuo pagrindinio šarvo	19
7 pav. Ti-6Al-4V titano lydinio mikrotanki struktūra ir ant jos padėta moneta	20
8 pav. Kompozicinių keramikos miltelių karšto presavimo krosnis	24
9 pav. Weibull funkcija apibūdinanti medžiagos lūžimo tikimybę	25
10 pav. Homogeniniai šarvai ant visureigio HMMWV	27
11 pav. Horizontalus plokštės storis, plokštei esant vertikaliai ir pasvirus 20°, 50° kampais	27
12 pav. Plokštės storio daugiklio priklausomybė nuo plokštės nuožulnumo	28
13 pav. Sviedinio skverbimasis į taikinio plokštę esant taikinio plokštei 20°, 40° ir 70° kampo nuožulnumams	28
14 pav. Šarvų su tarpais veikimo principas	29
15 pav. Šarvo komponavimas į kėbulo konstrukciją	29
16 pav. Reaktyvių šarvų veikimo principas	30
17 pav. Improvizuoti šarvai – grotos ant šarvuoto taktinio visureigio	30
18 pav. Lengvasis visureigis – Land Rover Defender M90	32
19 pav. Sunkvežimis iki 5 t – Mercedes-Benz Unimog U5000	33
20 pav. OSHKOSH taktinis šarvuotas visureigis JLTV	34
21 pav. Šarvuotas transporteris TPz Fuchs	35
22 pav. Pėstininkų kovos mašina BOXER-VILKAS	36
23 pav. Tankas Leopard 2A6	36
24 pav. Šūvio periodai	37
25 pav. Išorinės balistikos trajektorijos elementai	39
26 pav. 9×19 mm Georg Liuger šaudmens pagrindiniai matmenys	43
27 pav. Šaulių ginklų šaudmens ir sviedinio sandara	44
28 pav. Plieno šerdies ir apvalkalo sviedinys su švino galvute	45
29 pav. Sviedinio skverbimosi gylio (SSG) tyrimo schema	45
30 pav. Sviedinio skverbimosi gylio (SSG) matavimų grafikas	46
31 pav. Sviedinio skverbimosi ribos grafikas	47
32 pav. Sviedinio skverbimosi taikinyje kitimo grafikas	48
33 pav. Sviedinio KE priklausomybė nuo taikinio plokštės storio	49
34 pav. Sviedinio ir taikinių modeliai	52
35 pav. Sviedinio baigtinių elementų modelis	52
36 pav. Taikinių baigtinių elementų modeliai	53
37 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm plieno plokštę esant 20° ir 30° sviedinio atakos kampams	55
38 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm plieno plokštę esant 40° ir 50° sviedinio atakos kampams	55
39 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm aliuminio lydinio plokštę esant 50° sviedinio atakos kampamui	57
40 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm aliuminio lydinio plokštę esant 60° ir 70° sviedinio atakos kampams	58

41 pav. Sviedinio skverbimasis į dvi plieno plokštes po 2 mm storio, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas, esant 30° sviedinio atakos kampui	60
42 pav. Sviedinio skverbimasis į dvi plieno plokštes po 2 mm storio, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas esant, 40° sviedinio atakos kampui	61
43 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°	67
44 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°	68
45 pav. Taikinio plastinės dedormacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°	69
46 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	70
47 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	71
48 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	72
49 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	73
50 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	74
51 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	75
52 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	76
53 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	77
54 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	78
55 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	79
56 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	80
57 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°	81
58 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°	82
59 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°	83
60 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°	84
61 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°	85
62 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°	86
63 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°	87
64 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	88
65 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	89
66 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°	90
67 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	91
68 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	92
69 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°	93

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

KCT – kūbinė centruoto tūrio gardelė;

KCP – kūbinė centruoto paviršiaus gardelė;

HT – heksagoninė tanki gardelė;

Nm – nanometras;

Fe – geležis;

Ti – titanas;

Ni – nikelis;

Co – kobaltas;

Al – aliuminis;

Sn – alavas;

B – boras;

C – anglis;

N – azotas;

O – deguonis;

Si – silicis;

Spec – specialus;

KE – kinetinė energija;

JK – Jungtinė Karalystė;

JAV – Jungtinės Amerikos valstijos;

UHMWPE – ypač didelio molekulinio svorio polietilenas;

PBO – polibenzoksazolas;

SSG – sviedinio skverbimosi gylis;

NSA – NATO standartizacijos agentūra;

NATO – Šiaurės Atlanto sutarties organizacija;

PKM – pėstininkų kovos mašina.

Terminai:

Sviedinys – šaudmuo, kuris iš šaunamojo ginklo išsviedžiamas jėgos ir juda veikiamas kinetinės energijos.

Šūvis – sviedinio išmetimas iš vamzdžio kanalo, veikiant parako dujų slėgiui, susidariusiam sudegus parako užtaisui.

Trajektorija – tai kreivė, kuria juda sviedinio svorio centras.

Deviracija – besisukančio sviedinio krypimas nuo šaudymo plokštumos į kulkos sukimosi kryptį.

Anizotropinis – medžiagos savybės, kurios priklauso nuo krypties. Kita sąlyga, kuri gali atitikti anizotropinį apibrėžimą, yra skirtingų savybių buvimas skirtingomis kryptimis. Skirtingas cheminis sukibimas visomis kryptimis taip pat yra anizotropijos sąlyga.

Įvadas

Darbo aktualumas. Po Pirmojo pasaulinio karo pradėjus šarvuoti karines transporto priemones, o Antrojo pasaulinio karo metais sparčiai išstobulėjus šarvų pritaikymui karinėms transporto priemonėms, tai tapo neatsiejama karybos technologijų dalis. Šiuolaikinių karinių transporto priemonių šarvavimas yra išstobulintas ir tai šiuolaikinių technologijų pasekmė.

William`as H. McRaven`as pabrėžia, kad mūšio lauke kario manevringumas yra vienas iš pagrindinių pergalės priežasčių, tačiau kario išgyvenamumas mūšio lauke yra svarbiau už pačią pergalę. Būtent dėl šios priežasties šiuolaikinės karinės transporto priemonės technologiškai neturi analogų – jos yra manevringos ir tuo pačiu išlaikančios aukštus apsaugos standartus.

Tačiau paskutinio dešimtmečio karybos tendencijos diktuoja naujas taisykles ir karą laimi nebūtinai ta pusė, kuri turi naujausiomis technologijos paremtą ginkluotę ar techniką. Vykstančių karų istorija atskleidžia, kad dažnu atveju nėra galimybės turėti naujos ir modernios technikos, todėl kariai darosi išmintingesni ir kūrybingesni.

Darbo problematika. Karinės transporto priemonės iki 5 t dažniausiai neturi šarvuotos apsaugos, dėl vienos priežasties – tokios transporto priemonės tampa sunkios ir ne manevringos. Norint užtikrinti, kad tokios transporto priemonės turėtų tinkamą karių apsaugą ir būtų manevringos – labai išauga transporto priemonių kaina. Išskirtines užduotis, tokias kaip žvalgybines ar logistines, atliekantys kariai, dėl darbo specifikos naudoja transporto priemones iki 5 t, ko pasekoje kariai nėra užtikrinti apsauga nuo priešo tiesioginės ar netiesioginės ugnies.

Tikslas. Nustatyti negamyklinių šarvų nuo mažo kalibro šaulių ginklų kriterijus karinėms transporto priemonėms iki 5 t.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti karinių šarvuotų transporto priemonių naudojamus šarvus ir jų balistines charakteristikas.
2. Išanalizuoti karinių šarvuotų transporto priemonių konstrukcijas.
3. Atlikti sviedinio skverbimosi į nuožulnius šarvus tyrimą naudojant ANSYS programinę įrangą.
4. Pritaikyti atlikto tyrimo rezultatus šarvavimo kriterijų nustatymui.

1. Analizė

Idealiu atveju, šarvų sistema turėtų būti kuo efektyvesnė, kiek įmanoma lengvesnė ir nedidelių gabaritų. Tokia sistema turėtų naudoti medžiagas, kurių tankis yra mažas ir yra atsparios išorės jėgoms.

Skyriuje bus išanalizuotos šarvuoti skirtos naudojamos medžiagos, šarvavimo tipai ir jų pritaikymas įvairioms karinėms transporto priemonėms. Taip pat skyriuje bus išanalizuota balistika ir balistiniai tyrimai, tam kad kitame skyriuje būtų galima atlikti galinės balistikos tyrimą.

1.1. Šarvuoti naudojamos medžiagos

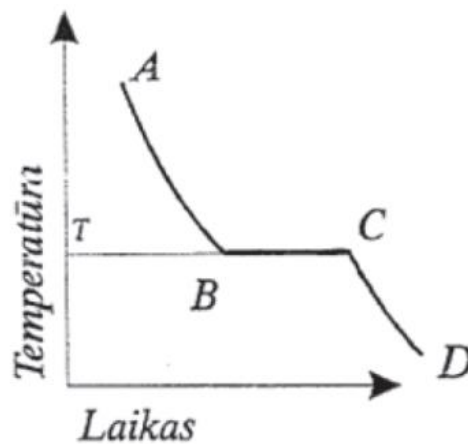
Šarvai paprastai būna energiją ardantys arba energiją sugeriantys. Energiją ardantys šarvai įprastai gaminami iš ypač kietų medžiagų, tokių kaip metalas arba keramika. Tokios medžiagos sviedinio kinetinę energiją išskaido atmušant sviedinį, arba suardant. Energiją ardantys šarvai taip pat gali būti gaminami iš judančių medžiagų, kurios sudaro reaktyvią šarvavimo sistemą (plačiau 1.2 poskyryje). Energiją sugeriantys šarvai, atvirkščiai energiją ardantiems šarvams, gaminami iš medžiagų, kurios sugeria sviedinio kinetinę energiją. Tokios medžiagos yra plastiškai deformuojamos.

Toliau bus apžvelgtos medžiagų savybės. Taip pat bus išanalizuotos pagrindinės šarvuoti naudojamos medžiagos ir jų charakteristikos.

1.1.1. Medžiagų struktūra ir savybės

Visos medžiagos sudarytos iš atomų. Kiekvienas medžiagos (cheminio elemento) atomas yra sudėtinga sistema, susidedanti iš teigiamą krūvį turinčio branduolio ir besisukančių aplink jį neigiamai įkrautų dalelių – elektronų. Atomo branduolį sudaro teigiamai įkrautos dalelės – protonai ir dalelės, neturinčios jokio krūvio – neutronai. Elektronai atomuose pagal jų energijos lygį susiskirstę sluoksniais ir posluoksniais. Pagal išorinių posluoksnių užpildymą ir nuo to priklausančias savybes, visi cheminiai elementai skiriami į keturias grupes: pirmoji grupė – inertinės dujos; antroji grupė – nemetalai; trečioji grupė – metalai; ketvirtoji grupė – pusmetaliai [1].

Metalų ir jų lydinių sandara kietajame būvyje yra kristalinė. T.y., metalų ir jų lydinių atomai erdvėje išdėstyti tam tikra geometrine tvarka, o ne chaotiškai, kaip amorfinių medžiagų. Kristaliniams kūnams ypač būdingas kristalizacijos procesas, t. y. perėjimas iš skysto būvio į kietą, esant tiksliai apibrėžtai temperatūrai, kuri vadinama kristalizacijos temperatūra (aušinant), arba lydimosi temperatūra (kaitinant) [1].

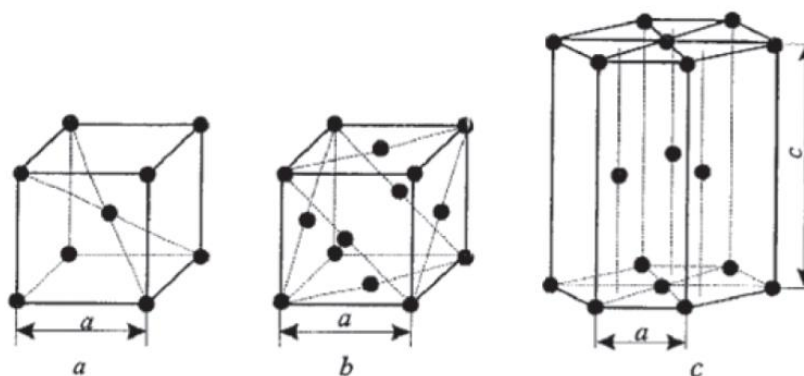


1 pav. Metalo aušinimo (kristalizacijos) kreivė. T – kristalizacijos (lydimosi) temperatūra [1]

Kaitinamas metalas tam tikroje temperatūroje lydosi ir suskystėja. Nustojus metalą kaitinti, skystas metalas pamažu aušta (atkarpa AB), ima stingti ir sukietėja (atkarpa BC). Žemiau šios temperatūros metalas yra kietame būvyje (atkarpa CD) (1 pav.) [1].

Metalas ir jo lydiniai gali kristalizuotis dviem etapais. Pirmajame kristalizacijos etape kristalai sudaro grūdelius, kurie metalui lėtai auštant, susiformuoja stambūs, o grūdeliams auštant greitai – jie tampa maži. Stambesnių grūdelių metalas minkštesnis, o smulkesnių kietesnis, todėl aušinant metalą skirtingu greičiu, jam galima suteikti įvairias kietumo ir stiprumo savybes. Tai vadinama terminiu metalų apdirbimu. Metalai yra kristalinės medžiagos, tačiau kai kurie metalai (Fe, Ti, Ni, Co, Sn) turi savybę kietajame būvyje, esant atitinkamoje temperatūroje, keisti savo vidinę sandarą. Ši metalų ir lydinių savybė vadinama antrine kristalizacija arba alotropija [1].

Mažiausias taisyklingas atomų derinys erdvėje, pasikartojantis medžiagoje bet kuria kryptimi, vadinamas elementariąja gardele. Metaluose dažniausiai sutinkamos trijų tipų elementariosios gardelės: KCT, KCP ir HT (2 pav.). Daugumos gardelių atstumai tarp atomų ir centrų (2 pav. matmenys a ir c) yra nuo 0,2 iki 0,6 nm [1].



2 pav. Metalų gardelės: a – kubinė centruoto tūrio gardelė (KCT), b – kubinė centruoto paviršiaus gardelė (KCP), c – heksagoninė tanki gardelė (HT) [1]

Įvairių medžiagų savybės skirstomos į chemines, technologines, fizines ir mechanines savybes. Cheminės ir technologinės medžiagų savybės šarvavimui yra svarbios gaminant naujas šarvavimo

medžiagos ir apdirbant esamas. Fizinės medžiagų savybės yra svarbios komponuojant šarvus, ir jos yra tokios [1]:

- tankis;
- elektrinis laidumas;
- šiluminis laidumas;
- šiluminis plėtimasis;
- šiluminė talpa;
- lydymosi temperatūra.

Tačiau transporto priemonėms šarvuoti yra svarbiausios mechaninės medžiagų savybės [2]:

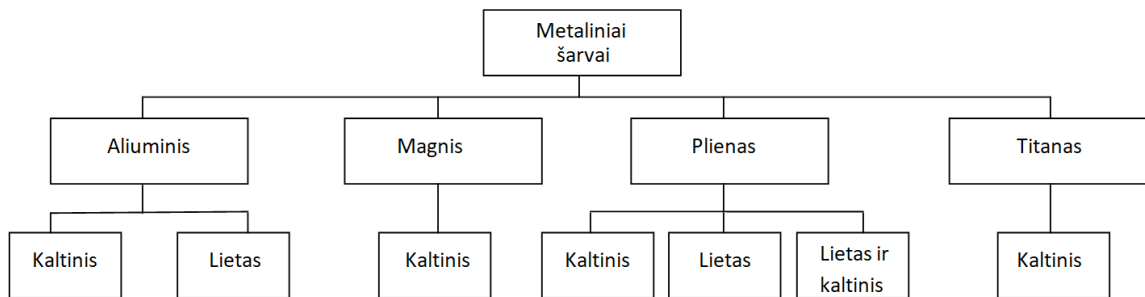
- Stiprumas, tai savybė priešintis išorinių jėgų poveikiui nesuyrant. Stiprumas įvertinamas tempiant, gniuždant, lenkiant, sukant. Stiprumo riba yra didžiausias sąliginis įtempis, kurį atlaiko medžiagos bandinys.
- Tamprumas, tai savybė sugrįžti į pradinę padėtį nustojus veikti išorinėms deformuojančioms jėgoms. Tamprumo riba yra didžiausias įtempis, iki kurio medžiagoje praktiškai nepastebima jokių plastinių (liekamųjų) deformacijų.
- Plastiškumas, tai savybė keisti savo formą nesuyrant, kai medžiagą veikia apkrova, ir išlaikyti nesikeičiančią formą po to, kai apkrova nustoja veikusi. Priešinga plastiškumui savybė – trapumas. Trapus suirimas yra pavojingas, nes konstrukcijos griūva staiga, be matomų deformacijų.
- Kietumas, tai medžiagos savybė priešintis įspaudimui į ją kitos, kietesnės medžiagos.
- Smūginis tūsumas, tai medžiagos pasipriešinimas smūginių apkrovų veikimui.

1.1.2. Metalai

Metalai yra plačiai naudojami transporto priemonėms šarvuoti. Apskritai, yra tik keturi praktiniai metalai, kurie yra naudojami transporto priemonėms šarvuoti. T. y. aliuminis, plienas, titanas ir magnis. Šie metalai pagal 2 pagrindinius apdirbimo būdus yra skirstomi (3 pav.) [5]:

1. Kaltinis metalas. Kaltinio metalo plokštės yra mechaniškai apdirbamos karštu arba šaltu būdu apdorojant medžiagą. Galima išskirti keturis tokių metalų apdorojimo būdus:
 - kalimas, kai metalo plokštė yra apdorojama plakimu arba nuolatinio spaudimu;
 - valcavimas, tai populiariausias metalo apdorojimas kaltiniu būdu, kadangi juo galima lengvai pasiekti norimus metalo plokščių storius ir jų charakteristikas. Valcavimas, tai medžiagos apdirbimas praleidžiant ją tarp dviejų skirtingomis kryptimis besisukančių velenų (4 pav.);
 - štapavimas, kai metalo plokštė yra forsuojama štampo, kuris yra tam tikros pasirinktos formos;
 - traukimas/stūmimas, kai metalas yra traukiamas arba stumiamas pro kūginės formos susiaurėjimą, taip gaunant strypus arba vielą.
2. Lietas metalas. Toks metalo apdirbimo būdas, iki Antrojo pasaulinio karo buvo tiesiog metalo liejimas ir stingdinimas pasirinktoje formoje. Po karo toks metalo apdirbimo būdas tapo nebe toks populiarus, kadangi kaltinio metalo mechaninės savybės buvo geresnės. Liejamo metalo pagerėjimas įvyko 1970 metais, kai buvo nustatyta, kad lieto metalo aušinimas skirtingose

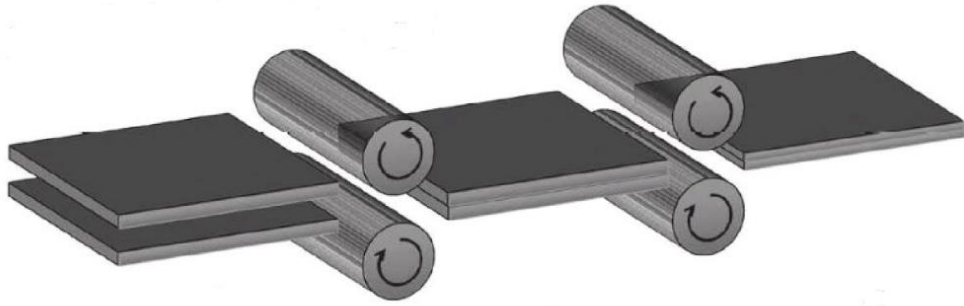
temperatūrose, skirtingai aušinant metalo sluoksnius ir aušinant jį lėtai arba greitai, jo mechaninės savybės pagerėja [5].



3 pav. Pagrindiniai šarvavimui naudojami metalai ir jų apdirbimo būdai [5]

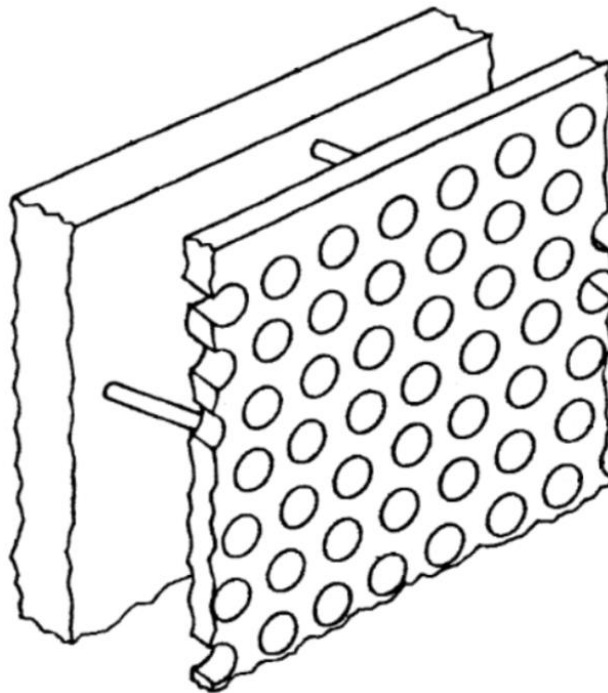
Aliuminis ir plienas yra dažniausiai naudojami metalai šarvavimui, atsižvelgiant į jų kainą, apdirbimo ir suvirinimo galimybes. Magnis ir titanas, nors yra brangūs metalai, turi tam tikras reikiamas savybes šarvavimui, kurių neturi aliuminis ir plienas. Pagrindiniai transporto priemonėms šarvuoti naudojami metalai [5]:

1. Plienas. Tai geležies lydinys, turintis iki 2,14 % anglies (C), taip pat mangano, silicio ir fosforo priemaišų. Tai dažniausiai transporto priemonių šarvavimui naudojamas metalas, kadangi jis yra visavertis, t. y., plienas yra kietas, turi geras nuovargio charakteristikas, jo lengva gamyba ir apdirbimas. Plienas taip pat yra pigus lyginant su kitomis šarvavimui naudojamomis medžiagomis. Šio metalo kietumas priklauso nuo anglies kiekio jame – kuo daugiau anglies, tuo plienas kietesnis. Pagal apdirbimo būdą ir kietumą Paul Hazell plieną išskiria į 4-ias grupes [5]:
 - Valcuotas homogeninis plienas. Šis plienas apdirbamas įprastu valcavimo būdu, tačiau kad toks plienas taptų kietesnis, jis po valcavimo yra įkaitinamas iki 820–860 °C temperatūros ir vėsinaamas alyvoje arba vandenyje. Toks plienas yra kietas ir trapus, todėl jis yra papildomai grūdinamas kelias valandas, laikant 400–650 °C temperatūroje. Po tokio apdirbimo valcuotas plienas yra kietas, tačiau pakankamai lankstus. Apdirbimo metu temperatūros yra parenkamos pagal norimą gauti rezultatą.
 - Didelio kietumo plienas. Tai homogeninis plienas, kurio apdirbimo būdas yra identiškas valcuotam homogeniniam plienui, tačiau grūdinimo procese plienas yra kaitinamas tik iki apie 200 °C, dėl to tokio plieno kietumas yra pasiekiamas didesnis negu 430 BHN.
 - Kintamo kietumo plienas. Tokio plieno plokštės skirtinguose sluoksniuose yra skirtingo kietumo. Kintamo kietumo plienas gali būti apdirbamas dviem būdais. Pirmuoju būdu plieninė plokštė yra grūdinama tik ties paviršiumi (paviršius įkaitinamas iki 850–900 °C temperatūros ir greitai atvėsinaamas skysčiu arba dujomis). Tokiu apdirbimo būdu plieno plokštė atitinkamuose sluoksniuose gali skirtis apie 200 BHN. Antrasis būdas yra dviejų ir daugiau skirtingo kietumo plieno plokščių suvalcavimas į vieną plokštę (4 pav.).

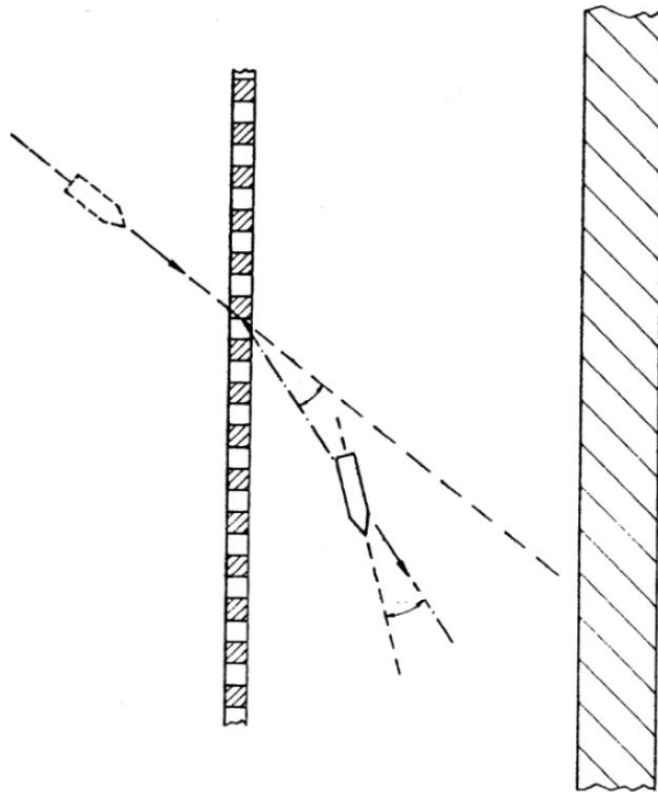


4 pav. Skirtingo kietumo plieno plokščių valcavimas [5]

- Perforuotas plienas. Perforuotų plieno plokščių kietumas gali būti įvairus, kadangi plienas parenkamas pagal norimus gauti rezultatus. Tokių plieno plokščių apdirbimas iš esmės yra paprastas – skylių išgrežimas plokštėje. Pagal Paul Hazell, perforuota plokštė montuojama apie 200–300 mm atsumu nuo pagrindinių transporto priemonės šarvų (5 pav.). Plieninėje plokštėje skirtingas skylių tankis, jų plotis ir gylis skirtingai veikia sviedinį, tačiau visų paskirtis vienoda – nukreipti, sulėtinti ar išskaidyti sviedinį ir jo KE (6 pav.).



5 pav. Perforuota plieno plokštė, su tarpu pritvirtinta prie pagrindinio šarvo [8]



6 pav. Perforuota plieno plokštė keičianti sviedinio skriejimo trajektoriją ir nukreipiantį sviedinį nuo pagrindinio šarvo [8]

Populiariausių, šarvavimui naudojamų, plieno lydinių 50CrV4 ir Hardox 450 charakteristikos nurodytos 1 lentelėje [4].

2. Aliuminis. Šis metalas transporto priemonėms šarvuoti pradėtas naudoti nuo 1960 m. JK žvalgybiniuose visureigiuose CVR ir JAV transporteriuose M113, kadangi buvo supasta, kad aliuminio tankis ir masė yra mažesnė už plieno. Bandymo būdu buvo nustatyta, kad norint atlaikyti tokio pačio tipo sviedinius ir jo KE, šarvai iš aliuminio lydinio yra lengvesni už plieno lydinio šarvus.

Transporto priemonėms šarvuoti aliuminis ir jo lydiniai įprastai yra apdirbami kaltiniu būdu. Populiariausio, šarvavimui naudojamo, aliuminio lydinio 7039-T6 charakteristikos nurodytos 1 lentelėje [4].

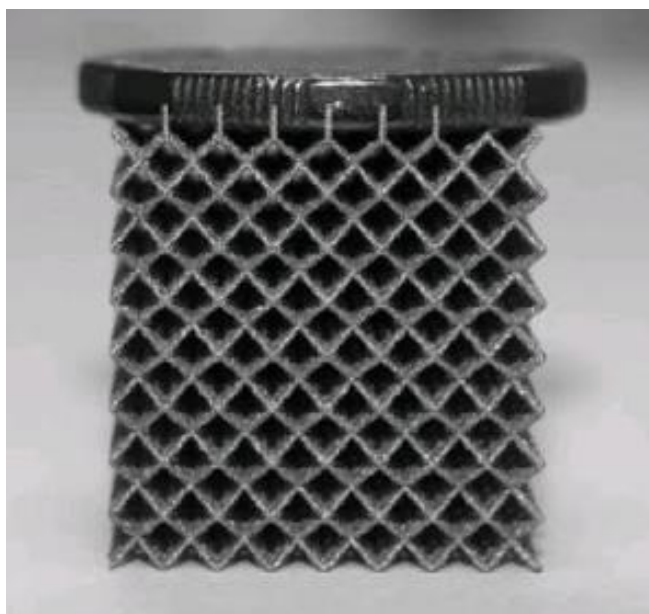
3. Magnis. Šis metalas yra anizotropinės struktūros, todėl jis neturi gerų mechaninių savybių, kurias būtų galima pritaikyti transporto priemonėms šarvuoti. Tačiau pridedant į magnį legiravimo elementų, tokių kaip aliuminis, cinkas ar kitų retų žemės metalų, magnio lydiniai turi tinkamas mechanines charakteristikas reikalingas transporto priemonėms šarvuoti [4].

Populiariausio, šarvavimui naudojamo, magnio lydinio AZ31B-H24 charakteristikos nurodytos 1 lentelėje [4].

4. Titanas. Tai metalas turintis geras mechanines savybes ir plačiai naudojamas transporto priemonių šarvų gamyboje, kadangi jis stipresnis ir kietesnis už plieną ir aliuminį, o tankis yra apie 60 % mažesnis lyginant su plienu. Tačiau, priklausomai nuo metalų gamintojų, titano kaina yra apie 10–20 kartų brangesnė už plieno kainą, todėl titanas naudojamas norint pasiekti aukštesnį apsaugos lygį kritinėse kariuomenėje naudojamose transporto priemonėse (pvz.: pėstininkų kovos mašinose, tankuose).

Arthur Jim ir Srouch Ian atkreipia dėmesį, kad transporto priemonėms šarvuoti titano lydinys yra naudojamas tik vienas – Ti-6Al-4V [4]. Populiariausio, šarvavimui naudojamo titano lydinio Ti-6Al-4V charakteristikos nurodytos 1 lentelėje.

Paul Hazell taip pat susistemino tyrimus atliekamus su medžiagomis, ir pateikė išvadas, kad geriausia metalų ir jų lydinių struktūra yra sudaryta iš korių, rombų ir piramidžių formų. Tokios struktūros metalai geriau sugeria sviedinio KE ir sprogo gūsius, negu tokie pat monolitiniai metalai. Tokios metalų struktūros yra mikrotankios ir jos yra paruošiamos lazerių pagalba, dėl to toks šarvo ruošimas yra labai brangus (7 pav.) [5].



7 pav. Ti-6Al-4V titano lydinio mikrotanki struktūra ir ant jos padėta moneta [5]

1 lentelė. Pagrindinių, šarvavimui naudojamų, metalo lydinių charakteristikos [4], [5]

Medžiaga	Tankis (kg/m ³)	Tempimo stipris (MPa)	Takumo riba (MPa)	Smūginis stiprumas (J)	Tamprumo modulis (GPa)	Kietumas (BHN 500kg)	Kietumas (HR C)	Jungo modulis (GPa)	Pailgėjimas iki trūkimo (%)
50CrV4 (grūdintas 170°C temperatūroje)	-	1885 ± 10	1845 ± 15	5 ± 2	-	598 ± 5	-	-	3 ± 1
50CrV4 (grūdintas 450°C temperatūroje)	-	1470 ± 14	1410 ± 13	14 ± 2	-	465 ± 4	-	-	6 ± 1
Hardox 450	-	1450 ± 8	1255 ± 7	60 ± 3	-	445 ± 3	-	-	11 ± 2
7039-T6	2740	450	380	-	69,6	133	-	-	13
AZ31B-H24	1780	245	150	-	44	-	-	-	7

Medžiaga	Tankis (kg/m ³)	Tempimo stipris (MPa)	Takumo riba (MPa)	Smūginis stiprumas (J)	Tamprumo modulis (GPa)	Kietumas (BHN 500kg)	Kietumas (HR C)	Jungo modulis (GPa)	Pailgėjimas iki trūkimo (%)
Ti-6Al-4V	4429	880	-	-	-	-	36	104	5

1.1.3. Pluoštiniai audiniai

Dėl didelio tempimo stiprumo (apie 2–5 GPa) ir mažo tankio (apie 1000–2000 kg/m³) karinėms transporto priemonėms šarvuoti plačiai naudojamos įvairios austos medžiagos. Žinoma, transporto priemonėms šarvuoti audiniai iš atskirų medžiagų neužtikrina pilnavertės apsaugos, todėl audiniai yra daromi iš dviejų ar daugiau sluoksnių, arba juos supinant taip sudarant pluoštinius audinius. Įprastai pluoštiniai audiniai sudaro vieną matricą, taip kompensuodami vienas kitą ir užtikrindami geresnes mechanines savybes. Paul Hazell išskiria tris pagrindinius pluoštinių audinių apdirbimo būdus [5]:

1. Kompresinis formavimas. Tai procesas, kurio metu iš anksto impregnuoti skirtingų medžiagų audiniai yra spaudžiami kartu įkaitintoje formoje. Impregnuojant pluoštinius audinius galima juos sutepti derva. Tokie audiniai po apdirbimo turi geresnes mechanines savybes, lyginant su sausa armatūra, tačiau yra brangesni ir turi ribotą tarnavimo laiką. Kompresinis pluoštinių audinių ruošimas geriausiai tinka didelio masto gamybai.
2. Autoklavinis formavimas. Šis procesas labai panašus į kompresinį formavimą, išskyrus tai, kad paruoštas ruošinys yra vakuumuojamas. Formuojant pluoštinį audinį kompresiniu ir vakuuminiu būdu, derva geriau sutvirtina audinius tarpusavyje. Audinių formavimas autoklavu yra lėtas procesas, tačiau gauto pluoštinio audinio kokybė yra aukšta.
3. Dervų perkėlimo formavimas. Šis formavimo procesas pradedamas, audinių pluoštus sudedant į norimą formą. Tada forma suspaudžiama, o derva pumpuojama į vidų, kol oras pasišalina ir forma yra užpildoma derva. Šildant formą apie 40 °C temperatūroje, derva sukietėja ir taip gaunamas ruošinys – pluoštinis audinys. Šis gamybos procesas plačiai pritaikytas automobilių sektoriuje ir tinka didelio masto gamybai.

Transporto priemonėms šarvuoti yra naudojama keletas rūšių pluoštinių audinių, įskaitant natūralius ir inžinerinius kompozitus. Paul Hazzell išskiria šešis pluoštinius audinius naudojamus transporto priemonėms šarvuoti [5]:

1. Aramidiniai pluoštai. Aramidiniai pluoštai, tokie kaip kevlaras arba tvaronas yra gaunami iš polimero molekulių, kurios turi benzeno. Šios molekulės lengvai lygiuojasi lygiagrečiai išilgai viena su kita ir sudaro tvarkingas struktūras. Pluoštai yra anizotropiniai, kurių išilginis modulis yra apie 65 kartus didesnis nei skersinis, dėl to aramidiniai pluoštai yra jautrūs skilimui. Tvaronas šarvavime nėra plačiai naudojamas, todėl toliau bus nagrinėjamas tik kevlaras. Kevlaras plačiai naudojamas kuriant šarvus, tačiau pagrindinis kevlaro panaudojimas yra ne transporto priemonėms šarvuoti, o aeronautikoje, sporto inventoriaus ir atskirtų kario ekipuotės dalių gamyboje. T.y. tose srityse, kur reikalingas tvirtumas ir kuo mažesnis gaminio svoris. Populiariausių, šarvavimui naudojamų aramido pluoštų Kevlaro 29, Kevlaro 49 ir Kevlaro KM2 charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [5].

2. Stiklo pluoštai. Stiklo pluoštas plačiai naudojamas kariuomenės aplinkoje – nuo karo laivų iki pėstininkų kovos mašinų. Svarbu atkreipti dėmesį, kad kompozicinės medžiagos, atskirai neužtikrina pakankamos apsaugos nuo šaulių ginklų ar didelio kalibro sviedinių KE, todėl didelio kietumo plokštės yra būtinos, tam, kad užtikrintų šarvo paviršių sviedinio ardomosiomis savybėmis [5].

Stiklo pluošto mechaninės savybės yra beveik panašios kaip kitų pluoštų, tokių kaip polimerai ir anglies pluoštas. Nors jis nėra toks tvirtas kaip anglies pluoštas, jis yra daug pigesnis ir žymiai mažiau trapus, kai naudojamas kompozituose. Todėl stiklo pluoštai naudojami kaip armatūra daugeliui poliamidų gaminių sudaryti labai stiprią ir santykinai lengvą pluoštu armuoto poliamido kompozicinę medžiagą, vadinamą stiklo armuotu plastiką. Šioje medžiagoje yra mažai oro, dujų arba išvis jų nėra, todėl medžiaga yra tanki [4].

Stiklu armuoti plastikai pasižymi dideliu atsparumu smūgiams (tempimo stiprumo riba 3–5 GPa). Be to, skirtingai nuo anglies pagrindu pagamintų kompozitų, jie gerai sugeria energiją, kai patiria balistinę ataką. Nors stiklo pluoštas plačiai naudojamas šarvavimui dėl savo gerų mechaninių savybių, tačiau pagrindinės stiklo pluošto savybės yra fizikinės – didelis atsparumas karščiui ir cheminėms medžiagoms. Populiariausių šarvavimui naudojamų E-stiklo ir S-2 stiklo pluoštų charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [4].

3. Bazaltiniai pluoštai. Bazaltas išgaunamas iš lengvai prieinamos žemės plutoje magminės uolienos. Bazalto pranašumas yra tas, kad dėl jo gausos ir lengvumo jį iškasti yra pigu. Iš jo taip pat yra lengvai išgaunami pluoštai, todėl yra naudojamas transporto priemonėms šarvuoti ir gali konkuruoti su stiklo pluoštu. Nors bazaltas yra išgaunamas iš uolienų ir yra ekologiškas, jis gerai išlaiko savo mechanines savybes tiek žemoje, tiek aukštoje temperatūroje. Apie bazalto gyvbingumą ir jo įtaką šarvavimui, atlikta mažai tyrimų. Bazaltinio pluošto charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [5].
4. UHMWPE pluoštai. UHMWPE paremti kompozitai yra unikalūs tuo, kad pluošto medžiaga yra įdėta į matricą, kuri pagaminta iš to paties tipo polimero, naudojamo pluoštui gaminti. Pluoštai susideda iš sintetiniu būdu pagaminto UHMWPE, o poliesterio anglies molekulės eina išilgai pluošto. Dėl to šie pluoštai yra labai stiprūs. Pasak Paul Hazell UHMWPE pluoštai turi dvi pranašias savybes gerai balistinei apsaugai [5]:

- didelės KE sugerties savybės;
- didelis elastingos bangos greitis.

Yra du UHMWPE pluoštai naudojami transporto priemonėms šarvuoti, tai Spectra ir Dyneema. Pastarasis pluoštas plačiai naudojamas kartu su keramikos šarvais, kaip padengiamoji medžiaga, tačiau gali būti naudojamas ir kaip atskira šarvavimo medžiaga. Žinoma, ši efektyvi Dyneema pluošto balistinė apsauga yra brangi [5].

Kadangi Spectra ir Dyneema pluoštai yra polietileno pagrindu, jo irimo temperatūra yra žema. Pluoštai lydosi esant maždaug 144–152 °C temperatūrai, todėl jų charakteristikos žymiai sumažėja, kai temperatūra priartėja prie šių verčių. Populiariausių, šarvavimui naudojamų, UHMWPE pluoštų Dyneema SK60 ir Spectra S-900-5600 charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [4].

5. PBO pluoštas. Nors Paul Hazell teigia, kad PBO pluoštas naudojamas ir transporto priemonėms šarvuoti, tačiau jis taip pat teigia, kad šis pluoštas dažnai naudojamas individualioms kario kūno apsaugoms gaminti. PBO pluoštas turi apie 5,2 GPa tempimo stiprumo ribą, tačiau pasak Paul Hazell, šis pluoštas blogėja dėl aplinkos sąlygų. Manoma, kad PBO nėra visiškai stabilus, todėl

balistiniai bandymai su šiuo pluoštu vis dar atlikinėjami [5]. PBO pluošto charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [4].

6. Anglies pluoštai. Anglies pluoštai yra naudojami labai plačiai – nuo dviračių rėmų iki orlaivių pertvarų. Tačiau, pasak Paul Hazell, kompozitai iš anglies pluošto nėra tinkami balistinei apsaugai užtikrinti. Šie pluoštai reaguoja į impulsines apkrovas ir tai yra dėl epoksidinės dervos trapumo ir mažų anglies leistinių įtempių, dėl to anglies pluoštai yra mažo stiprumo. Taip pat Paul Hazell teigia, kad anglies pluoštas yra tuo pačiu labai standus ir stiprus, kai jis yra bandomas plokštumoje (išilgai pluošto krypties), todėl jie naudojami karinėse platformose, kur reikalingas lengvas konstrukcijos tvirtumas [5]. Populiariausių, šarvavimui naudojamų, anglies pluoštų HT-T300, HT-T700 ir HT-AS4 charakteristikos nurodytos 2 lentelėje [4].

2 lentelė. Pagrindinių šarvavimui naudojamų, pluoštinių audinių charakteristikos [4], [5]

Medžiaga	Tankis (kg/m ³)	Tempimo stipris (MPa)	Gniuždymo stipris (MPa)	Tamprumo modulis (GPa)	Jungo modulis (GPa)	Lydimosi temperatūra (°C)	Pailgėjimas iki trūkimo (%)
Kevlaras 29	1440	2920	-	-	70,50	427-482	3,6
Kevlaras 49	1440	3000	-	-	112,40	427-482	2,4
Kevlaras KM2	1440	3880	-	-	84,62±4,18	-	4,52±0,37
E-stiklo pluoštas	2580	3445	1080	76	-	846	-
S-2 stiklo pluoštas	2460	4890	1600	97	-	1056	-
Bazalto pluoštas	2670	2800-3100	-	85-87	-	-	3,15
Dyneema SK60	970	2800	-	88	87	144 - 152	3,5
Spectra S-900-5600	-	2180	-	66	-	144 - 152	3,5
PBO pluoštas	1540	5200	-	180	-	-	3,5
HT-T300	1760	3530	-	230	-	-	-
HT-T700	1800	5300	-	235	-	-	-
HT- AS4	1790	4000	-	241	-	-	-

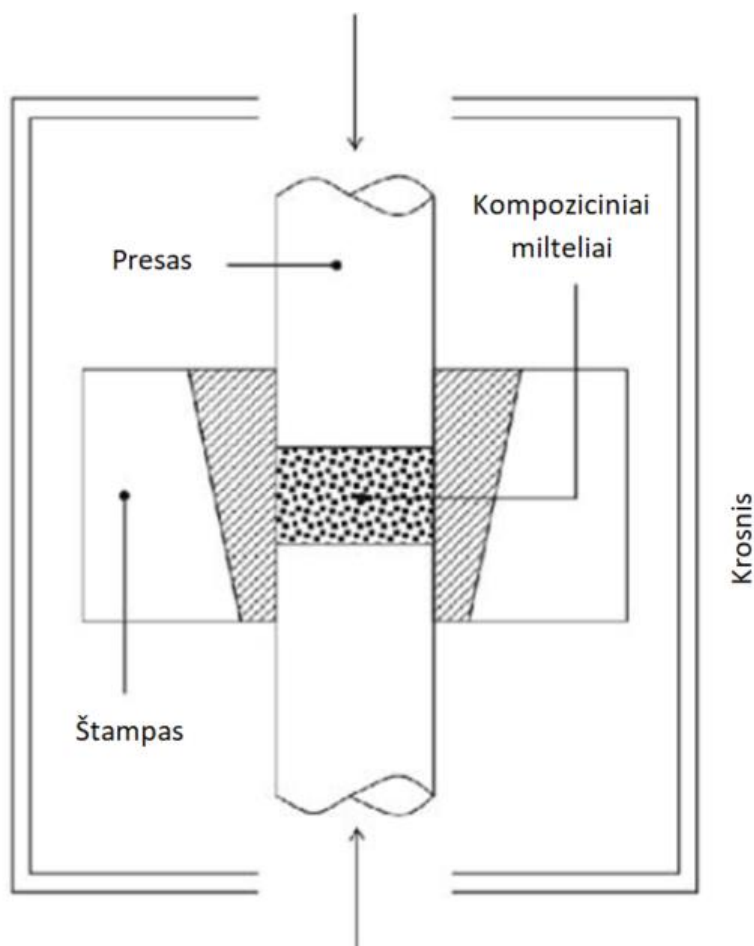
1.1.4. Keramika ir stiklas

Terminas „keramika“ kilęs iš graikų kalbos žodžio Keramikos, kuris pažodžiui reiškia „sudegę daiktai“. Tai byloja apie tai, kad ankstyvieji graikai gamino keraminius puodus, indus ir pan. Taigi keramiką galima apibrėžti kaip neorganinį kietą junginį, kuris paprastai susidaro veikiant šilumai, o kartais šilumai ir slėgiui. Pasak Paul Hazell, keraminių šarvų kompozitai yra sudaryti iš mažiausiai vieno metalo, pusmetalio arba nemetalų [5].

Keramika, naudojama transporto priemonėms šarvuoti yra polikristalinės medžiagos, sudarytos iš daugybės grūdelių. Paul Hazell teigia, kad keraminio šarvo tankis teoriškai priklauso nuo

keramikoje komponuojančio metalo, pusmetalio arba nemetalo atominės masės. Taip pat Paul Hazell teigia, kad šarvų keramika susideda iš nedidelio skaičiaus savarankiškai pasirenkamų elementų, iš kurių pagrindiniai yra AL, B, C, N, O, Si ir Ti [5].

Pati keramika yra gaunama iš labai smulkių keramikos miltelių (<5 μm), tankinimo būdu, vadinamu sukepinimu. Keramikos kompozitas, naudojamas transporto priemonėms šarvuoti, yra gaunamas tokiu pat būdu kaip ir keramika, papildomai apdirbant presavimu, o kartais ir vakumu, naudojant karštą preso krosnį. Sukepinant keramikos ir metalo miltelius gaunamas kermetas. Tipinės karšto presavimo krosnies schema pavaizduota 8 pav. [5].



8 pav. Kompozicinių keramikos miltelių karšto presavimo krosnis [5]

Paul Hazell teigia, kad keramika turi ribotą plastiškumą kambario temperatūroje ir dažnai lūžta elastingoje terpėje. Keramikos atsparumas lūžiams yra žemas ir daug žemesnis, nei aprašoma teorijoje. Priežastis yra trūkumai konstrukcijos veikiančiuose įtempiuose, kurie gali sukelti įtrūkimų susidarymą, kai tik patiriamas mechaninis stresas. Šiuos trūkumus gali sukelti vidiniai mikro įtrūkimai, vidinės poros ar priemaišos [5].

Palyginus su elastingomis medžiagomis, keramika patiria gana platų įtempių diapazoną, sukelti medžiagos lūžimą, ir tai veda į tikimybinį požiūrį apibūrinant šios medžiagos lūžimo ribą. Todėl Paul Hazell išnagrinėjo Švedų inžinieriaus Weibull (1951) pasiūlytą būdą kaip apibūrinti keramikos stiprio pokyčius. Weibull apibrėžė medžiagos lūžimo tikimybę $P_s(V_0)$ iš dviejų medžiagos konstantų: m ir σ_0 . Tai gali būti aprašoma funkcija [5]:

$$P_s(V_0) = \exp \left\{ -\frac{\sigma^m}{\sigma_0^m} \right\} \quad (1)$$

Kai taikomas įtempis $\sigma = 0$, tada kaip tikėtasi medžiaga nelūžta, o $P_s(V_0) = 1$. Padidėjus veikiamam įtempiui, lūžimo tikimybė didėja, t.y. kai $\sigma \rightarrow \infty$, tada $P_s(V_0) \rightarrow 0$. Čia m – Weibull modulis, kuris apibrėžia, kaip greitai medžiagos atsparumas lūžiams krinta keičiantis nuo $P_s(V_0) = 0$ iki $P_s(V_0) = 1$.

Jeigu:

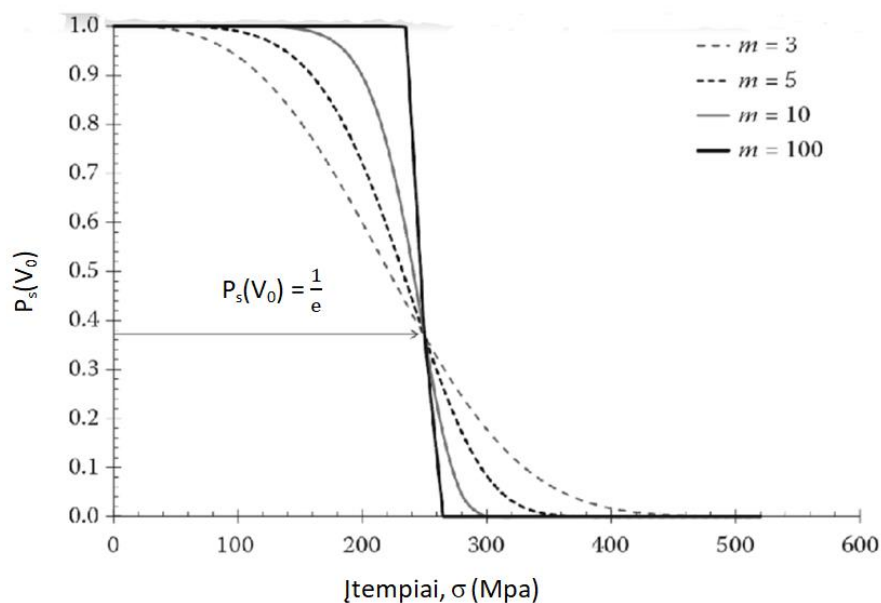
$$\sigma = \sigma_0 \quad (2)$$

Tada:

$$P_s(V_0) = \frac{1}{e} = 0,37 \quad (3)$$

Todėl σ_0 galima apibūdinti kaip įtemptį, kurio metu mėginio tikimybė nesulūžti yra 37%.

9 pav. Parodyta Weibull paskirstymo funkcija, kur $\sigma_0 = 250$ MPa, o modulis m keičiasi nuo 3 iki 100 [5].



9 pav. Weibull funkcija apibrėžianti medžiagos lūžimo tikimybę [5]

Paul'is Hazell'as pabrėžia, kad kompozicinės keramikos m vertė bus 5–10, o metalų m vertė bus 90–100. Tradicinės keramikos, tokios kaip plyta, m vertė bus mažesnė nei 3 [5].

Stiklas yra giminingas keramikai, kadangi gaminamas iš silicio dioksido (gamtoje randamas kaip smėlis arba kvarcas), yra kietas, tačiau taip pat neatsparus lūžiams. Silicio dioksidas, aliuminio dioksidas ir keramika yra pagrindiniai elementai išgaunant safyrą, stiklą, keraminį stiklą, špinelį ir pan. [4].

Kadangi keramika ir stiklas dėl savo struktūros yra kietos medžiagos, tačiau neatsparios lūžiams, tai transporto priemonėms šarvuoti naudojami tik keramikos ir stiklo kompozitai. Populiariausių,

šarvavimui naudojamų, keramikos ir stiklo kompozitų safyro, keraminio stiklo ir A1ON charakteristikos nurodytos 3 lentelėje [4].

2 lentelė. Pagrindinių, šarvavimui naudojamų, keramikos ir stiklo kompozitų charakteristikos [4]

Medžiaga	Tankis (kg/m ³)	Tempimo stipris (MPa)	Kietumas (GPa)	Tamprumo modulis (GPa)	Lydimosi temperatūra (°C)
Safyras	3970	742	-	-	2040
Keraminis stiklas	2900	180	7	122	1650
A1ON	3695	380	18,5	323	2150

1.2. Šarvų tipai

Transporto priemonės šarvai gali būti skirtingi ir yra komponuojami pagal poreikį. Oficialios karinėms transporto priemonėms šarvuoti naudojamos technologijos ir šarvavimo būdai nėra išskirti, todėl žemiau išskirti 6 neoficialūs karinių transporto priemonių šarvavimo tipai:

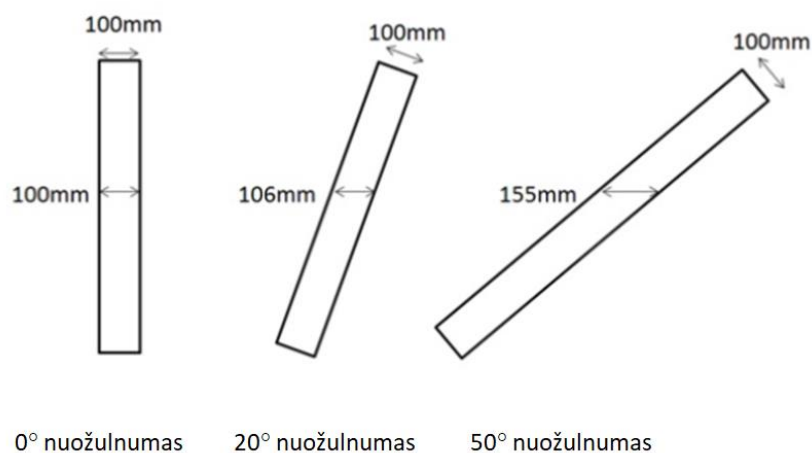
1. Homogeniniai šarvai. Populiariausi homogeniniai šarvai būna iš plieno arba kevlaro, kartais naudojamas titanas arba aliuminis. Karinės transporto priemonės su homogeniniais plieniniais šarvais yra sunkios, todėl tokia transporto priemonė praranda manevringumą. Pastarąją problemą gali išspręsti kevlariniai šarvai, tačiau kevlaras yra brangus, todėl ne visada karinėms transporto priemonėms tai yra pritaikoma.

Transporto priemonių šarvavimas atskiromis vienalytėmis medžiagų plokštėmis yra paprasčiausias būdas, toks būdas yra pigiausias, tačiau nėra labai efektyvus. Dažniausiai karinių transporto priemonių, kurių šarvavimui naudojama tik vienos medžiagos plokštės, apsauga užtikrinama tik tam tikrose vietose. Nors homogeniniai šarvai įprastai yra sunkūs, jie labiausiai paplitę tarp transporto priemonių iki 5 t (visureigiai, sunkvežimiai ir pan.), kadangi tokioms transporto priemonėms reikalinga mažesnė apsauga. Vienos medžiagos šarvas labiau paplitęs tarp atskirų kario ekipuotės elementų, pvz. šarvinės liemenės kevlarinė ploštė arba kevlarinis šalmas.



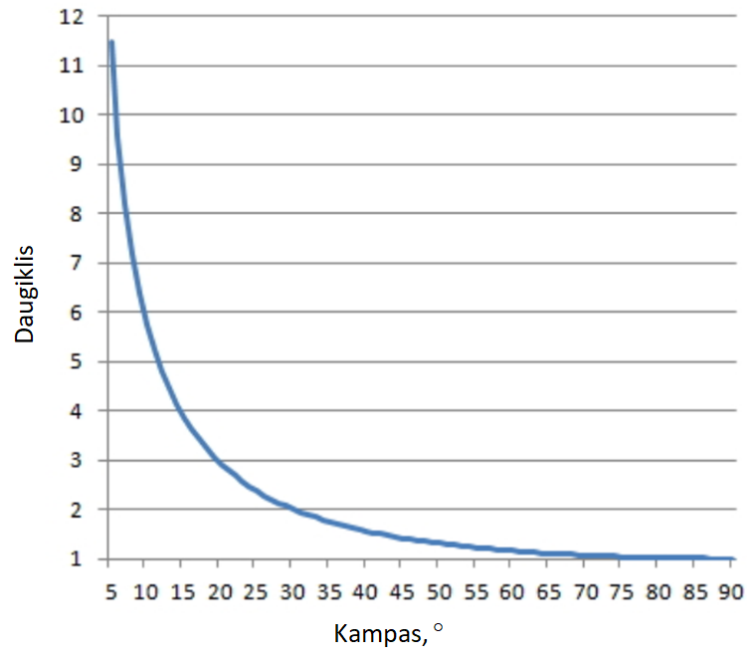
10 pav. Homogeniniai šarvai ant visureigio HMMWV [21]

2. Nuožulnūs šarvai. Akivaizdžiausias būdas padidinti šarvuotos transporto priemonės apsaugą yra padidinti fizinį šarvo plokštės storį. Kai šarvo plokštė yra nuožulni sviedinio atakos kampo atžvilgiui, santykinis šarvo storis arba matymo (horizontalioji) linija padidėja (11 pav.). Taigi, tam kad sviediniui pramušti šarvą, jis turi prasiskverbti pro didesnį šarvo kiekį nei yra tikrasis jo storis.



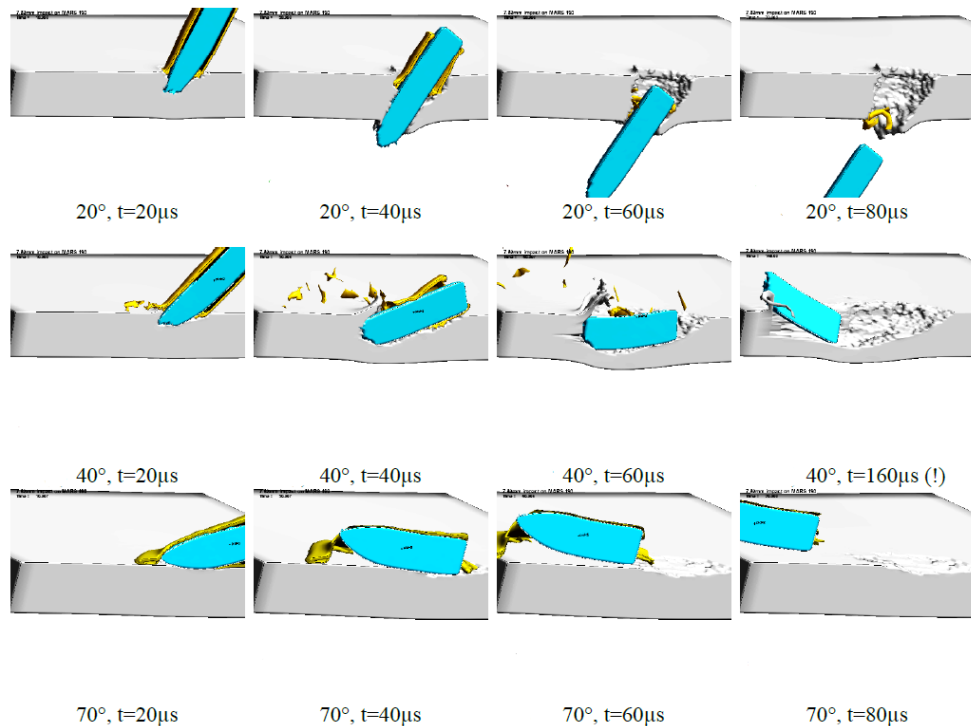
11 pav. Horizontalus plokštės storis, plokštei esant vertikaliai ir pasvirus 20°, 50° kampais [15]

Christian Ankerstjer teigia, kad didinant šarvo plokštės nuožulnumą, šarvo storis labai greitai keičiasi. Pakreipus šarvo plokštę 20° – šarvo storis padidėja apie 7 %, tačiau šarvo plokštę pakreipus 30° – šarvo storis padidėja apie 36 %. Pasak Christian, daugiklis (kiek kartų padidėja plokštės storis tam tikru kampu) gali būti apskaičiuojamas faktinį plokštės storį padalinus iš plokštės nuožulnumo kampo laipsniais (12 pav.) [14].



12 pav. Plokštės storio daugiklio priklausomybė nuo plokštės nuožulnumo. Čia kampas žymi plokštės pasvirimą, 90° - plokštė statmena, 0° - plokštė horizontali [14]

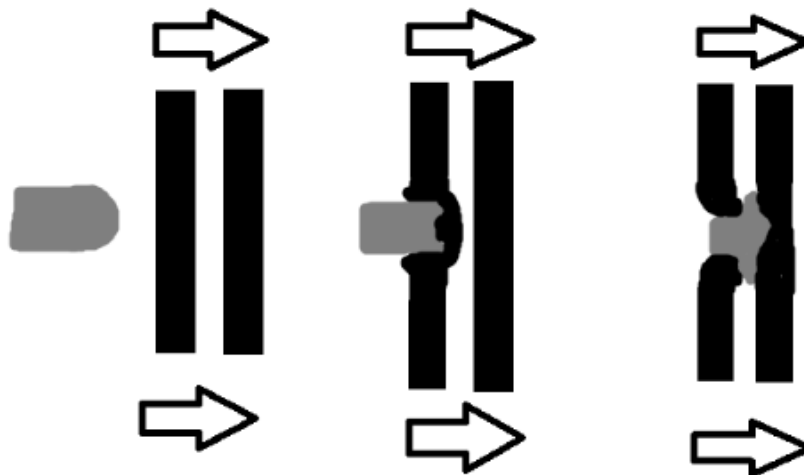
Taip pat, Marvin Becker atliktame sviedinio rikošetavimo tyrime aiškiai matoma, kad nuožulniai šarvo plokštei reikia didesnės sviedinio KE ją pramušti, dėl to padidėja tikimybė sviedinio rikošetavimui (13 pav.). Tyrime Marvin Becker naudoja 7,62 mm kalibro sviedinį, kuris 800 ± 20 m/s greičiu skverbiasi į 8 mm storio plieno plokštę, kurios kietumas 350 HB [20].



13 pav. Sviedinio skverbimasis į taikinio plokštę esant taikinio plokštei 20°, 40° ir 70° kampo nuožulnumams [20]

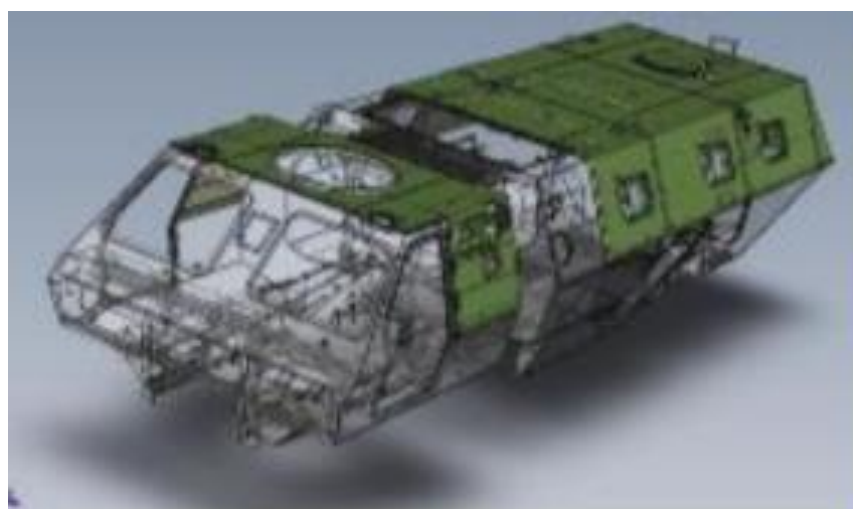
Taigi, dėl šių priežasčių galima teigti, kad toks šarvavimo būdas yra labai geras apsaugos, kokybės ir kainos atžvilgiu. Taip pat toks šarvų tipas gerai veikia prieš didelio kalibro sviedinius.

3. Šarvai su tarpais. Tokio šarvavimo principas yra toks, kad tuščiavidurė erdvė ardo smūgio sukeltą bangą, todėl sviedinys praranda savo pagreitį (14 pav.). Šis šarvavimo tipas, dėl savo veikimo principo, yra efektyvus prieš įvairaus tipo sviedinius, o taip pat antrasis šarvo sluoksnis nebūtinai turi būti metalas, todėl tokia konstrukcija išlieka santykinai lengva.



14 pav. Šarvų su tarpais veikimo principas [15]

4. Laminuoti šarvai. Tai labiausiai paplitęs šarvo tipas dėl kainos ir kokybės santykio. Kokybė šiame šarve apibrėžiama, kaip skirtingų medžiagų panaudojimas išgaunant lengvą masę ir geresnę apsaugą, negu suteikia viena medžiaga. Laminuotų šarvų balistinis veikimo principas labai panašus į anksčiau minėtų pluoštinių audinių, skiriasi tik tuo, kad laminuoti šarvai susideda ne tik iš pluoštinių audinių, bet ir iš metalų, keramikos ar stiklo. Šie šarvai gaminiami iš skirtingų balistinių savybių turinčių medžiagų sluoksnių, kurie tarpusavyje yra supresuojami ir apdirbami karščiu, kad visas šarvas būtų kuo tankesnis. Toks šarvo tipas dažniausiai yra pagrindinis ir komponuojamas integruojant jį į kėbulo konstrukciją (15 pav.).



15 pav. Šarvo komponavimas į kėbulo konstrukciją [22]

5. Reaktyvūs šarvai. Tai cheminės sudėties šarvai paremti sprogimu. Šie šarvai skirti prieštankiniams ir ≤ 40 mm granatoms atremti. Veikimo principas: kėbulas apmontuojamas kryptinėmis minomis, kurios elektrocheminiu būdu reaguoja į artėjantį spogmenį, detonuojasi ir sprogsta kartu su sprogmeniu apie 1 m atstumu nuo transporto priemonės kėbulo (16 pav.). Tokiu būdu transporto priemonė nėra pažeidžiama tiesiogiai, o tik skeveldromis arba sprogimo gūsiu [16].



16 pav. Reaktyvių šarvų veikimo principas [16]

6. Improvizuoti šarvai. Šis šarvų tipas nėra oficialus ir sertifikuotas. Improvizuoti šarvai, įprastai būna antrinė arba papildoma apsaugos priemonė. Dažniausiai pasitaikantys improvizuoti šarvai yra grotos ant transporto priemonės kėbulo (17 pav.), kurios apsaugo nuo prieštankinių granatsvydžių (alternatyva reaktiviams šarvams).



17 pav. Improvizuoti šarvai – grotos ant šarvuoto taktinio visureigio [15]

Šarvų gamintojai ir įmonės, kurie atlieka įvairių transporto priemonių šarvavimą įprastai nenaudoja vieno šarvavimo tipo, o kombinuoja juos kartu. Taip išgaunamas efektyviausias transporto

priemonės apsaugos lygis pagal užsakovo pageidavimus. Tikslių transporto priemonėms šarvuoti technologijų ir metodų, gamintojai neatskleidžia.

1.3. Šarvavimo lygiai

NATO NSA inicijuoja, koordinuoja, remia ir administruoja NATO standartizacijos veiklą, kuri yra vykdoma vadovaujant Europos standartizacijos komitetui. NSA užduotis yra skatinti NATO standartizaciją, siekiant sustiprinti bendrą aljanso karinių pajėgų operatyvinį pajėgumą [12].

Transporto priemonių apsaugos reglamentavimui yra du NSA išleisti standartai:

- STANAG 4686 „Šarvuotų transporto priemonių pagalbinių apsaugų charakteristikos pagal lygius“ [9]. Šis dokumentas standartizuoja transportų priemonių su reaktyviais šarvais apsaugą nuo minų ir prieštankinių sviedinių.
- STANAG 4569 „Logistinių ir lengvai šarvuotų transporto priemonių keleivių apsaugos lygiai“ [10]. Šis dokumentas standartizuoja šarvuotų transporto priemonių apsaugą nuo KE ir nurodo karinių transporto priemonių šarvavimo lygius (4 lentelė).

4 lentelė. Karinių transporto priemonių šarvavimo lygiai ir jų sąlygos [10]

Šarvavimo lygis	Sviedinys	Greitis (m/s)	Atstumas (m)	Taikymosi azimutas	Taikymosi pakilimas
5	25 mm x 137 APDS-T, PMB 073	1258	200	±30°	0°
4	14,5 mm x 114 API/B32	911	200	0–360°	0°
3	7,62 mm x 51 AP (WC core)	930	30	0°–360°	0°–30°
	7,62 mm x 54R B32 API	854			
2	7,62 mm x 39 API BZ	695	30	0°–360°	0°–30°
1	7,62 mm x 51 NATO ball	833	30	0°–360°	0°–30°
	5,56 mm x 45 NATO SS109	900			
	5,56 mm x 45 M193	937			

Čia greitis – vidutinis, galima tolerancija ±20 m/s

Kaip pasiekiami karinių transporto priemonių šarvavimo lygiai pagal STANAG 4569 standartą, aprašo NATO standartas AEP-55 „Logistinių ir lengvai šarvuotų transporto priemonių apsaugos lygio įvertinimo procedūros“ [11]. Šis NATO standartas nurodo kaip turi būti atliekami bandymai, t. y. nurodomi detalūs:

- sistemos priėmimo procesas (bandymo planai, transporto priemonės ir jos šarvų aprašymai, pažeidžiamumo vertinimas ir pan.);
- bandymui reikalinga įranga (šovos mechanizmai, sviediniai, matavimo sistemos, taikinių pavyzdžiai ir pan.);

- bandymo procedūros ir rezultatų vertinimas (bandymo aplinkos sąlygos, sviedinio pataikymo į taikinį žymėjimai ir jų skaičiavimai, sviedinio pataikymo į taikinį pagrystumo vertinimai, ataskaitos ir pan.).

1.4. Karinių transporto priemonių konstrukcijos

Karinių transporto priemonių konstrukcijos, kaip ir šarvų tipai nėra atskleidžiami gamintojų ar naudotojų. Be naudojimo paskirties, pagrindiniai šių transporto priemonių skirtumai – jėgainė, važiuoklė, kėbulo konstrukcija ir šarvavimo tipas. Poskyryje aptariami šie skirtumai išskiriant karines transporto priemones į šešias grupes: lengvieji visureigiai ir sunkvežimiai iki 5 t, specialios paskirties transporto priemonės, taktinės transporto priemonės, transporteriai, pėstininkų kovos mašinos ir tankai su haubicomis kartu.

1.4.1. Lengvieji visureigiai ir sunkvežimiai iki 5t

Lengvieji visureigiai (18 pav.) ir sunkvežimiai iki 5 t (19 pav.) yra skirti kariams ir nedideliems kroviniams vežti. Šios transporto priemonės nėra šarvuojamos (galimos išimtis), kadangi šarvai šioms transporto priemonėms pridėtų papildomo svorio ir tokiu būdu jos taptų nemanevringos [3]. Karinių lengvųjų visureigių ir sunkvežimių iki 5 t jėgainės įprastai būna atmosferinės, dyzelinu varomos tam, kad užtikrintų lengvą priežiūrą. Važiuoklės dalys dažnu atveju būna aukštesnės pagaminimo kokybės, tačiau pati konstrukcija, kaip ir kėbulo konstrukcija nesiskiria nuo civilinių transporto priemonių.



18 pav. Lengvasis visureigis – Land Rover Defender M90 [23]



19 pav. Sunkvežimiai iki 5 t – Mercedes-Benz Unimog U5000 [23]

1.4.2. Spec. paskirties transporto priemonės

Spec. paskirties transporto priemonės gali būti įvairios konstrukcijos ir paskirties. Pagal tai galima išskirti šešis spec. paskirties transporto priemonių tipus:

1. bortiniai sunkvežimiai virš 5 t, skirti vežti karius ir krovinius;
2. platforminiai sunkvežimiai su hidrauline kėlimo funkcija, skirti vežti konteinerius, kitas transporto priemones ir pan.;
3. medicininės pagalbos, skirti pervežti sužeistuosius;
4. autocisternos, skirtos vežti vandenį, kurą ir kitus skysčius;
5. evakuaciniai sunkvežimiai, skirti kitų transporto priemonių evakuacijai atlikti;
6. inžinerinės transporto priemonės, kurios yra plačios paskirties ir įvairių konstrukcijų. Jas galima išskirti į du pagrindinius tipus: kranai ir tanko platforma, ant kurios sumontuoti įvairūs agregatai (tiltai, minų kultuvai, buldozerių mentės, gervės, ekskavatoriniai krautuvai ir pan.).

Būna išimčių, tačiau šios karinės paskirties transporto priemonės nėra šarvuojamos dėl paprastos priežasties – šios transporto priemonės skirtos atlikti tam tikrą darbą ir mūšio zonoje įprastai nedalyvauja. Šių spec. transporto priemonių jėgainės, važiuoklės, kėbulo konstrukcijos ir papildomi agregatai komponuojami pagal atkirus kariuomenės poreikius ir yra konfidencialūs, todėl šios transporto priemonės toliau nebus analizuojamos. Verta paminėti, kad spec. paskirties transporto priemonės, kurios turi šarvinę apsaugą, jų apsauga yra tik nuo šaulių ginklų (išskiriant inžinerinius tankus, kurie turi šarvuotą apsaugą nuo didelio kalibro sviedinių, sprogmenų ir jų sukeltos bangos.). Tokių transporto priemonių apsauga įprastai siekia STANAG 4569 standarto 1-ą arba 2-ą apsaugos lygį, naudojamos homogeninius, nuožulnius, laminuotus su tarpais šarvus ir jų kombinacijas.

1.4.3. Taktinės transporto priemonės

Taktinės transporto priemonės pagal paskirtį gali būti išskirtos į:

1. padidinto pravažumo visureigius;
2. žvalgybines transporto priemones;
3. spec. paskirties transporto priemones (radijo ryšiui palaikyti, inžinerinėms užduotims atlikti ir pan.).

Kariai su taktinėmis transporto priemonėmis dalyvauja arti mūšio zonos arba mūšio zonoje, todėl įprastai šios transporto priemonės turi šarvuotą apsaugą. Šarvuota apsauga siekia STANAG 4569 standarto antrą arba trečią apsaugos lygį, kadangi taktinės transporto priemonės turi išlaikyti santykį tarp manevringumo ir apsaugos.

Šių transporto priemonių jėgainės, važiuoklės, kėbulo konstrukcijos ir papildomi agregatai, kaip ir anksčiau minėtos spec. paskirties transporto priemonėse yra komponuojamos pagal atkirus kariuomenių poreikius ir yra konfidencialios informacijos.

Kad taktinės transporto priemonės išlaikytų aukštus šarvavimo reikalavimus, bet tuo pačiu išliktų nedidelių gabaritų ir manevringos – joms įprastai montuojami laminuoti šarvai, dėl savo gerų mechaninių savybių. Kartais šios transporto priemonės turi homogeninius, nuožulnius arba improvizuotus šarvus (20 pav.).



20 pav. OSHKOSH taktinis šarvuotas visureigis JLTV [16]

1.4.4. Transporteriai

Transporterio pagrindinė paskirtis – nugabenti karius iki mūšio zonos (21 pav.). Iš paskirties galima suprasti, kad kariai būdami transporteriye neturi tiesioginio kontakto su priešu (tačiau galimas), dėl to transporteriai kaip ir taktinės transporto priemonės siekia STANAG 4569 standarto antrą arba trečią apsaugos lygį.

Kadangi transporteriai gali gabenti iki skyriaus dydžio (apie 10 karių) karių grupę ilgesnį atstumą raižyta vietoje, vadinasi šios transporto priemonės turi mažai panašumų į civilines transporto priemones. Transporteriai turi didelę masę (apie 15000–25000 kg), todėl įprastai jie būna ratuoti 6x6, 6x4 arba vikšriniai. Šių transporto priemonių jėgainės, važiuoklės, kėbulo konstrukcijos ir papildomi agregatai komponuojami pagal atkirus kariuomenių poreikius ir yra konfidencialūs.

Dėl didelio pravažumo ir reikalavimo, kad kariai, esantys viduje, išliktų saugūs – transporteriai gali būti šarvuojami visais 1.2 poskyryje išvardytais šarvavimo tipais atskirai arba kombinuojant.



21 pav. Šarvuotas transporteris TPz Fuchs [24]

1.4.5. PKM

PKM pagrindinė paskirtis – dalyvauti mūšio zonoje. Iš paskirties galima suprasti, kad kariai esantys kovos mašinoje turi tiesioginį kontaktą su priešu, todėl PKM siekia STANAG 4569 standarto ketvirtą arba penktą apsaugos lygį.

Kadangi PKM gali dalyvauti tiesioginiame kontakte, o taip pat ir gabenti iki skyriaus dydžio karių grupę, vadinasi šios transporto priemonės neturi jokių analogų. PKM turi didelę masę (apie 20000–40000 kg), todėl įprastai jie būna ratuoti 8x8, 6x6 arba vikšriniai. Šių transporto priemonių jėgainės, važiuoklės, kėbulo konstrukcijos ir papildomi agregatai komponuojami pagal atkirus kariuomenių poreikius ir yra konfidencialūs.

Kad PKM pasiektų ketvirtą arba penktą apsaugos lygį, pagal STANAG 4569 standartą – šios transporto priemonės naudoja visus 1.2 poskyryje išvardytus šarvavimo tipus. Pagrindinės PKM konstrukcijos išskirtys – priekinės transporto priemonės nuožulnumas, kad atlaikytų didelio kalibro ir prieštankinius sviedinius, ir didelė karių apsauga, dėl to kapsulė, skirta karių gabenimui turi storus laminuotus šarvus (22 pav.).



22 pav. Pėstininkų kovos mašina BOXER-VILKAS [23]

1.4.6. Tankai ir haubicos

Tankų pagrindinė paskirtis – dalyvauti mūšio zonoje. Tankai įprastai siekia STANAG 4569 standarto penktą apsaugos lygį.

Tankai turi didelę masę (apie 50000–70000 kg), todėl jie būna vikšriniai (23 pav.). Šių transporto priemonių jėgainės, važiuoklės, kėbulo konstrukcijos ir papildomi agregatai komponuojami pagal atkirus kariuomenės poreikius ir yra konfidencialūs. Kad tankai pasiektų penktą apsaugos lygį, pagal STANAG 4569 standartą – jie naudoja visus 1.2 poskyryje išvardytus šarvavimo tipus, tačiau dažniausiai naudojami nuožulnūs, laminuoti su tarpais ir reaktyvūs šarvai.

Haubicos nors ir dalyvauja mūšio zonoje netiesiogiai, tačiau jos yra potencialus priešo taikyns, todėl įprastai turi panašių savybių (konstrukcija, važiuoklė, jėgainė ir šarvavimo būdas) kaip tankai. Jos taip pat siekia tokį patį apsaugos lygį pagal STANAG 4569 standartą – penktą.



23 pav. Tankas Leopard 2A6 [24]

1.5. Balistika

Balistika – mokslas, tiriantis sviedinių, minų, aviacinių bombų, nevaldomų raketų ir kt., iššautų (paleistų) kūnų judėjimo dėsnius [13].

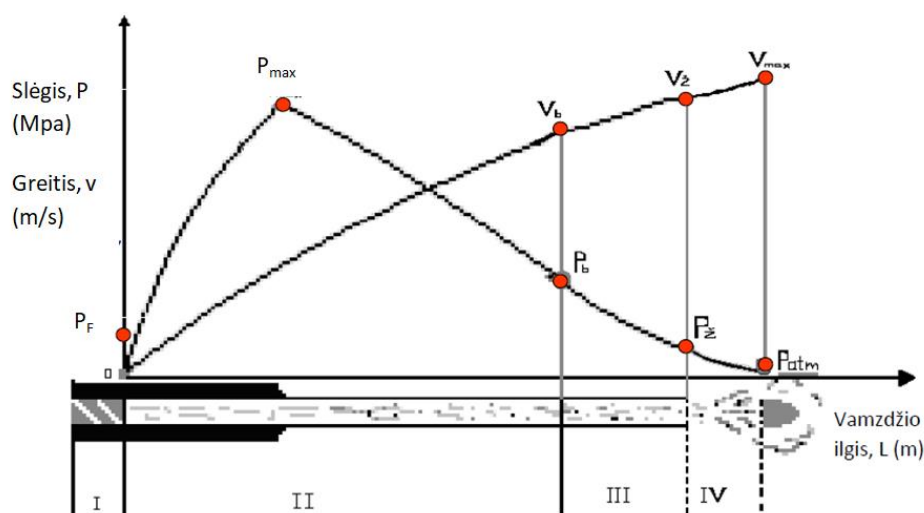
Balistika skirstoma į dvi pagrindines dalis: vidinė balistika ir išorinė balistika. Taip pat yra tarpinė balistika (tiria sviedinio judėjimą tuo metu, kai jis palieka vamzdį ir varančios dujos patenka į aplinką) ir galinė balistika (tiria sviedinio sąveiką su taikiniu, sviedinio ir suirusio sviedinio dalių judėjimą taikinyje (kūne, šarve ir pan.).

1.5.1. Vidinė balistika

Vidinė balistika – tiria sviedinių, minų, aviacinių bombų, nevaldomų raketų ir kt., iššautų (paleistų) kūnų, veikiamų parako dujų, judėjimą ir kt. procesus vamzdyje ir parakinių raketų degimo kameroje. Vidinės balistikos pagrindiniai skyriai: pirosatika (tiria parako degimo ir dujų susidarymo uždaroje erdvėje dėsningumą) ir pirodinamika (tiria procesus vamzdžio kanale šūvio metu ir nustato ryšius tarp jų, konstrukcinių vamzdžio charakteristikų ir užtaisymo sąlygų) [13].

Šūvis balistikoje tyrinėjamas kaip labai greitos parako cheminės energijos transformacijos į šiluminę, paskui į sviedinio judėjimo energiją procesas. Šūviui turi įtakos didelis dujų slėgis (2000–3500 °C) ir maža reiškinio (šūvio) trukmė (apie 0,001 s) [6].

Jačiauskas Ignas ir Aleksandras Venckus šūvį suskaido į keturis, einančius vienas paskui kitą, periodus (24 pav.) ir juos aprašo taip [6]:



24 pav. Šūvio periodai. Čia I, II, III, IV – šūvio periodai; P_f – forsavimo slėgis; P_{max} – maksimalus slėgis; P_b ir v_b – slėgis ir kulkos greitis baigus degti parakui; P_z ir v_z – slėgis ir kulkos greitis prie vamzdžio žiočių; v_{max} – maksimalus greitis; P_{atm} – atmosferos slėgis [6]

“Pirmasis periodas tęsiasi nuo parako užtaiso degimo pradžios iki visiško kūno įsirėžimo į vamzdžio graižtvas (arba esant lygiam vamzdžiui, iki kūno judėjimo pradžios).

Antras periodas tęsiasi nuo kūno judėjimo pradžios iki visiško parako užtaiso sudegimo, kuris dega greitai kintančiame tūryje. Šio šūvio periodo metu sudega visas parako užtaisas ir kūnas pasislenka didžiausia vamzdžio ilgio dalimi. Periodo pradžioje, kai kūno judėjimo greitis nedidelis, dujų kiekis

auga greičiau nei erdvėje tarp kūno ir tūtos dugno, dujų slėgis sparčiai didėja ir pasiekia maksimalų dydį (slėgį) P_{\max} . Jis susidaro kūnui pasislinkus 40–60 mm.

Trečiasis periodas, tęsiasi nuo visiško parako užtaiso sudegimo iki kūno išlėkimo iš vamzdžio kanalo. Šio periodo metu parako užtaisas jau nedega, tačiau stipriai suspaustos ir įkaitusios dujos slėgia kūną ir didina jo judėjimo greitį. Esant trumpam vamzdžiui, trečio periodo gali ir nebūti, nes iki kūno išlėkimo iš vamzdžio kanalo parako užtaisas nespėja sudegti.

Ketvirto periodo metu kūnas išlekia iš vamzdžio, bet parako dujos vis dar veikia jo dugną. Ketvirtasis periodas pasibaigia tuo momentu, kai parako dujų slėgis į kūną susilygina su oro slėgiu.”

Taip pat vidinę balistiką, be šūvio periodų, Jačiauskas Ignas ir Aleksandras Venckus aprašo taip [6]:

“Parako dujos išsiveržia iš vamzdžio kanalo 1200–2000 m/s greičiu, veikia kūną ir suteikia jam papildomą greitį. Slėgis krinta nuo forsavimo (P_z) iki atmosferinio (P_{atm}). Didžiausią maksimalų greitį (v_{\max}) kūnas pasiekia ketvirto periodo pabaigoje – keletas centimetrų nuo vamzdžio žiočių. Įkaitusioms parako dujoms (anglies oksidui ir vandeniliui), išeinančioms iš vamzdžio paskui kūną susidūrus (susimaišius) su oru (deguonimi), susidaro smūgio banga ir blyksnis – tai yra garso šaltinis ir šūvio liepsna.

Pradiniu greičiu (v_z) vadinamas sviedinio sąlyginis greitis prie vamzdžio žiočių. Šaudymo lentelėse nurodomas pradinis greitis yra truputį didesnis už greitį prie vamzdžio žiočių (v_z). Tai atliekama dėl tokios priežasties: kulkai išlėkus iš vamzdžio, ją dar veikia parako dujos (ketvirtasis šūvio periodas) ir kulkos greitis padidėja. Šio veikimo laikas yra nedidelis ir, skaičiavimų supaprastinimui, teigiama, kad dujos už vamzdžio ribų neveikia kulkų. Tuomet kulkos greitis prie vamzdžio žiočių nepriklauso greičio kitimo kreivei, todėl pradinis kulkos greitis turi būti toks, kad greičio kitimo kreivė po ketvirtojo šūvio periodo sutaptų su realia greičio kitimo kreive.

Pradinis sviedinio greitis nustatomas bandymo keliu. Pradinio greičio dydis nurodomas šaudymo lentelėse ir ginklų kovinėse charakteristikose. Didėjant pradiniam greičiui, didėja kulkos lėkimo tolis, ugnies tikslumas, tiesiojo šūvio tolis, naikinamoji ir pramušamoji galia, mažėja išorės sąlygų poveikis jos lėkimui. Sviedinio pradinis greitis priklauso nuo vamzdžio ilgio, kulkos svorio, parako užtaiso svorio, temperatūros bei drėgnumo, parako grūdelių dydžio ir formos, užtaisymo tankio.”

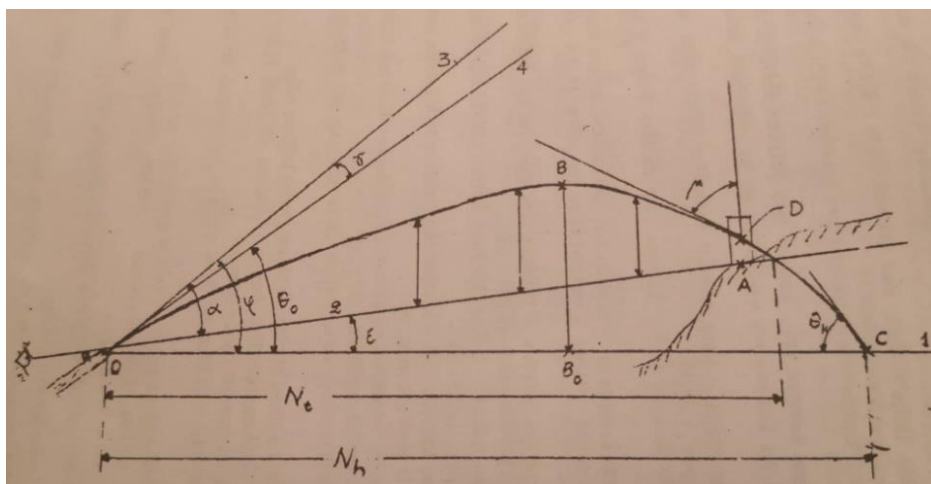
1.5.2. Išorinė balistika

Išorinė balistika – tiria sviedinių, minų, aviacinių bombų, nevaldomų raketų ir kt. iššautų (paleistų) kūnų, kai jie išlekia iš vamzdžio (leidimo įrenginio), judėjimo ore dėsnius ir veiksnius, veikiančius šį judėjimą [13].

Pagrindinis išorės balistikos uždavinys yra nustatyti, koku pradiniu greičiu, koku pakilimo kampu ir kokios formos turi būti sviedinys, kad jis pasiektų norimą žemės arba erdvės tašką. Kiti išorės balistikos uždaviniai yra meteorologinių sąlygų įtakos sviedinio lėkimui nustatymas, pataisų lentelių sudarymas ir besisukančio sviedinio lėkimo tyrimas [7].

Pasak Igno Jačiausko ir Aleksandro Venckaus, besisukančio sviedinio skriejimas ore yra labai sudėtingas reiškinys. Skriejančią kulką veikia dvi pagrindinės jėgos: sunkio jėga ir oro pasipriešinimo jėga. Sunkio jėga priverčia kulką laipsniškai leistis žemyn, o oro pasipriešinimo jėga

– sulėtinti greitį ir verstis. Dėl šių jėgų veikimo sviedinių trajektorija turi nesimetriškai išlenktos kreivos linijos formą (25 pav.) [6].



25 pav. Išorinės balistikos trajektorijos elementai. Čia O – ginklo horizontas; A – taikymosi taškas; 2 – taikymo linija; 3 – pakilimo linija; α – taikymo kampas; φ – pakilimo kampas; 4 – metimo linija; θ_0 – metimo kampas; γ – išlėkimo kampas; B – trajektorijos viršūnė; BB_0 – trajektorijos aukštis; θ_k – kritimo kampas [6]

Oro pasipriešinimo jėga ir jo poveikis sviediniui kur kas didesnis nei sunkio jėga. Pvz. jei esant metimo kampui $\theta_0 = 15^\circ$ ir pradiniam greičiui $v_0 = 800$ m/s, sviedinys beorėje erdvėje nuskrietų 32620 m, tai tomis pačiomis sąlygomis, esant oro pasipriešinimui, sviedinys nuskrietų tik 3900 m, t. y. 8 kartus arčiau. Oro pasipriešinimo jėgos dydis priklauso nuo sviedinio formos, kalibro, paviršiaus, lėkimo greičio ir oro tankio [6].

Oro pasipriešinimo jėgą R (kg) Ignas Jačiauskas ir Aleksandras Venckus pateikia kaip empirinę formulę [6]:

$$R = \frac{1000 k d^2}{g} H(y) F(v) ; \quad (4)$$

Čia k – sviedinio formos koeficientas; d – sviedinio kalibras, m; H(y) – oro pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo aukščio, m; F(v) – oro pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo greičio, m/s.

Sviedinys stabilizuojamas jį išukant. Sukamąjį judesį kulkai suteikia vamzdžio sienelių graižtvos. Žinant ginklo techninius duomenis, galima apskaičiuoti sviedinio sukimosi greitį. Pvz. AK74 pradinis kulkos greitis yra 900 m/s, graižtvos žingsnio ilgis 200 mm = 0,2 m. Teigiant, kad kulkos greitis yra pastovus (900 m/s) ir vieną apsisukimą ji padaro 0,2 m kelyje, gauname, kad vieną kartą kulka apsisuka per 0,2/900 s arba kulka daro 900/0,2 = 4500 apsisukimų per sekundę. Šis rezultatas yra apytikslis, nes pradinis greitis nėra toks pat kaip prie vamzdžio žiočių ir sviedinio greitis vamzdyje kinta [6].

1.5.3. Galinė balistika

Norint suprasti ir ištestuoti kokia transporto priemonių apsauga nuo sviedinių yra geriausia, reikia suprasti kaip sviediniai įsiskverbia į medžiagas ir struktūras. Sviedinio skverbimosi procesas yra

įtakojamas medžiagos, į kurią sviedinys skverbiasi savybių. Taip pat šį procesą įtakoja ir sviedinio medžiaga, geometrija, smūgio greitis ir sviedinio svoris.

Pramušamąją sviedinio galią charakterizuoja sviedinio KE. Judančio sviedinio KE pagal Paul Hazell skaičiuojama šia formule [5]:

$$KE = \frac{mv^2}{2}; \quad (5)$$

čia m – sviedinio masė; v – sviedinio greitis šiame taške.

$$m = \frac{q}{g}; \quad (6)$$

čia q – sviedinio svoris; g – laisvojo kritimo pagreitis.

Vadinasi:

$$KE = \frac{qv^2}{2g}. \quad (7)$$

Pagal šią formulę, žinant sviedinio svorį ir greitį, lengvai apskaičiuojama kulkos energija bet kuriame jos trajektorijos taške.

Paul Hazell teigia, kad norint nustatyti sviedinio įsiskverbimą į plastiškai deformuojamą terpę, galima naudoti paprastą analizę. Tuo pačiu reikia suprasti, kad analizė atliekama supaprastintu požiūriu, kadangi šis procesas yra labai sudėtingas ir nėra iki galo išanalizuotas [5].

Pagal Paul Hazell imamas plokščio priekio sviedinys, kuris mažesniu kaip 1000 m/s greičiu smogia tam tikro pločio plokštei. Sviedinys nesideformuoja, o įsiskverbimas į plokštę įvyksta dėl plokštės plastinės deformacijos. Tam, kad plokštė nesideformuotų ir sviedinys būtų sustabdytas, sviedinio KE turi būti išskaidyta, jam atsitrenkus į plokštę. Tai galima paskaičiuoti pagal formulę [5]:

$$\frac{1}{2} mv_0^2 = (\sigma A_1)h; \quad (8)$$

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4}; \quad (9)$$

čia σ – normaliniai įtempiai, MPa; A_1 – taikinio skerspjūvio plotas; d – skerspjūvis.

Lygtis išreiškiama:

$$\left[\frac{\frac{1}{2}mv_0^2}{A_1} \right] \times \frac{1}{d} = \sigma \left[\frac{h}{d} \right]; \quad (10)$$

čia kairėje lygties pusėje yra KE. Lygtis pertvarkoma ir supaprastinama:

$$\frac{mv_0^2}{d^3} = \frac{\pi}{2} \sigma \left[\frac{h}{d} \right]; \quad (11)$$

Jeigu šūvis yra daromas su kampu, tada lygtis modifikuojama pridendant šūvio kampą:

$$\frac{mv_0^2}{d^3} = \frac{\pi}{2} \sigma \left[\frac{h}{d} \right] \left[\frac{1}{\cos \theta} \right]^k; \quad (12)$$

čia k – empirinė konstansta, nuliamenti medžiagos gebėjimą pasukti sviedinį jo skverbimosi metu; $\cos \theta$ – efektyvus sviedinio storis, esantis plokštės storiui, sviedinio smūgio kampu.

Sviedinio skverbimuisi į taikinį galimas šlytis, todėl pateikiant išvestį yra daroma prielaida, kad šlytis yra visada [5].

Laikantis anksčiau pateiktos logikos, skverbties lygtį Paul Hazell pateiktia taip [5]:

$$\left[\frac{\frac{1}{2}mv_0^2}{A_2} \right] \times \frac{1}{d} = \tau \left[\frac{h}{d} \right]; \quad (13)$$

$$A_2 = \pi dh; \quad (14)$$

čia A_2 – sviedinio skerspjūvio plotas; τ – šlyties koeficientas.

Lygtis pertvarkoma ir supaprastinama:

$$\frac{mv_0^2}{d^3} = 2\pi\tau \left[\frac{h}{d} \right]^2; \quad (15)$$

Bendroji skverbties lygtis gaunama tokia:

$$\frac{mv_0^2}{d^3} = c \left[\frac{h}{d} \right]^n; \quad (16)$$

Paul Hazell nagrinėjamas Jacobson pasinaudoja anksčiau pateikta analize ir apibūdina sviedinio skverbimasi nuo pastarojo susidūrimo su taikiniu iki jo perėjimo per taikinį, pateikdamas formules [5]:

$$KE_{\text{skverbimosi}} = \sigma \frac{\pi d^2}{4} h = \sigma \frac{\pi d^3}{4} \left(\frac{h}{d} \right); \quad (17)$$

čia σ - tempimo stipris, Mpa.

$$KE_{\text{prasiskverbimo}} = \tau \pi dh^2 = \tau \pi d^3 \left(\frac{h}{d} \right)^2; \quad (18)$$

1.6. Šaulių ginklų šaudmenys ir jų klasifikavimas

Visi šaudmenys skiriasi savo savybėmis, t. y. forma, svoriu, parako kiekiu ir sviedinio sandara. Visa tai šūvio metu įtakoja sviedinio maksimalų greitį, nuotolį ir jo suformuotą efektą (įprastai sviedinio KE tenkanti taikiniui). Prieš analizuojant sviedinio charakteristiką, pirma apibrėžiama bendroji šaulių ginklų šaudmenų klasifikacija. Pastarieji klasifikuojami pagal [17]:

1. Kalibrą. Pagrindinė šaudmenų charakteristika yra jo kalibras. Šaudmenų kalibrą nusako ginklo vamzdžio kanalo skersmuo tarp graižtvų laukų arba tarp graižtvų, arba kulkos liemens skersmuo, arba laisvai pasirenkamas kalibro žymėjimas, siekiant nesumaišyti praktiškai vienodų, tačiau įvairiose šalyse skirtingiems ginklams gaminamų šaudmenų (26 pav.). Pvz., 7,62 mm kalibro Tokarevo, 7,63 mm kalibro Mauzerio ir 7,65 mm kalibro Manlicherio šaudmenys yra tos pačios formos ir matmenų, kaip ir jų prototipas 7,65 mm kalibro Borchardo šaudmuo, sukonstruotas 1893 m., tačiau jų kalibras ir rūšis vadinami skirtingai.

2. Paskirtį:

- koviniai – skirti kariams kauti, karo technikai naikinti ir kitoms kovinėms užduotims vykdyti;
- pagalbiniai – tai gali būti mokomieji, tuštieji, praktiniai arba bandomieji;
- medžiokliniai – skirti medžiojamiems gyvūnams ar naikinamiems kenkėjams kauti;
- sportiniai – skirti sportiniais veiksniams;
- trauminiai – tai nemirtinieji šoviniai, skirti riaušėms malšinti ir pan. veiksniams;
- darbiniai – naudojami šaunamųjų ginklų tipo įrankiuose, pvz., statybiniuose pistoletuose, kuriais išaunamos vinys.

3. Tūtos būvimą:

- tūtiniai – įprastiniai šaudmenys, turintys tūtą;
- betūčiai – tūtos vietą užima presuotas specialios parako tipo medžiagos blokelis. Tai kol kas eksperimentiniai šaulių ginklams naudojami šaudmenys.

4. Tūtos konstrukciją:

- butelio forma – tokias tūtas turi didžioji dauguma šaudmenų, skirtų šaudyti iš ilgavamzdžių graižtvinių ginklų (išskyrus 5,6 mm kalibro šautuvinius kraštinio įskėlimo ir dar kelis mažiau paplitusius sviedinius);
- cilindro arba kūgio forma – tokias tūtas turi pistoletiniai ir revolveriniai šaudmenys (viena iš nedaugelio išimčių – 7,62 mm kalibro sviediniai Tokarevo pistoletams, 7,63 mm kalibro sviediniai Mauzerio pistoletams yra butelinėmis tūtomis).

5. Sviedinio apvaskalą:

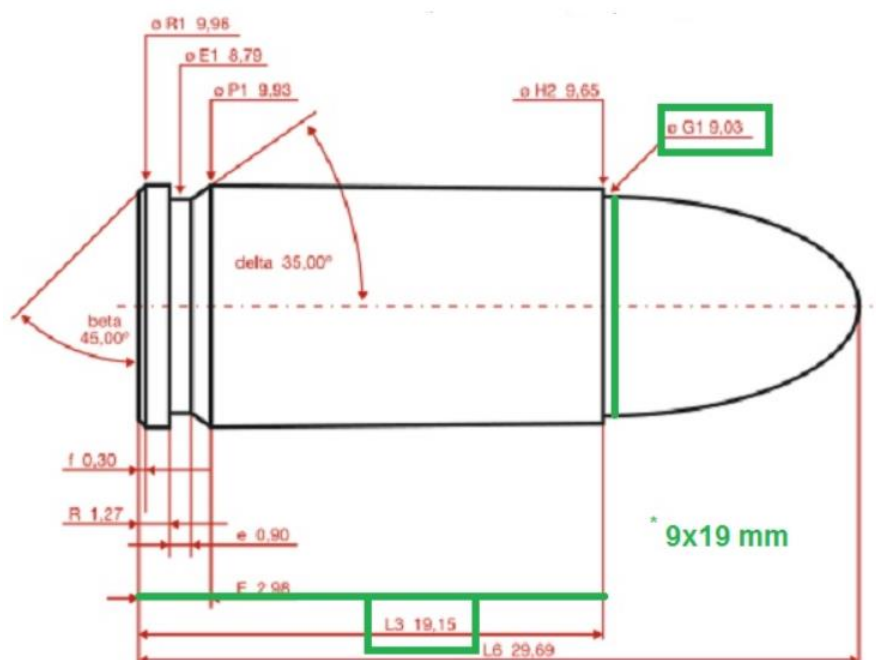
- apvaskalinės – tokie šaudmenų sviediniai turi visiškai galvutę ir liemenį dengiantį apvaskalą, pagamintą iš vario lydinio ar plieno, padengto vario lydiniu. 2016 m. pradėti gaminti sviediniai, kurių paviršius padengiamas molibdeno bisulfitu. Apvaskalinių sviedinių šerdys yra švininės arba plieninės;
- beapvaskalinės – tokie šaudmenų sviediniai gaminami iš švino lydinio. Šie sviediniai yra pilkos (švino) spalvos, juosvos (jeigu kulkos paviršius grafituotas) spalvos. Kartais beapvaskalinių sviedinių paviršius padengiamas plona vario lydinio danga ir yra rausvos ar gelsvos spalvos;
- pusiau apvaskalinės – tokių šaudmenų sviedinių apvaskalas nedengia kulkos galvutės priekinės dalies, tačiau ištiesai dengia sviedinio liemenį ir apačią. Tokios konstrukcijos sviedinius turintys šaudmenys vadinami ekspansyviniais. Tokie sviediniai, susidūrę su kliūtimi, lengvai deformuojasi – susiplodama išsiplečia sviedinio priekinė dalis, arba suskyla į kelias dalis. Tuo pasiekiamas didesnis sviedinio žalojamasis poveikis. Kai kurie pusiau apvaskaliniai sviediniai didesniai ekspansyvumui pasiekti, gaminami tuščiaviduriu smaigaliu. Pusiau apvaskalinių sviedinių šerdys yra švininės (tiksliau iš švino lydinio, turinčio iki kelių procentų stibio).

6. Ginklo tipą:

- šautuvų šaudmenys – tai graižtvinių šautuvų šaudmenys, pradedant 5,45×39 mm ir baigiant 12,7×108 mm. Pastaruosius šovinius dažniausiai naudoja kulkosvaidžiai, bet naudoja ir

snaiperiniai šautuvai. Snaiperiniams šautuvams skirti šaudmenys paprastai gaminami itin tiksliai, kad padidintų taiklumą. Šautuvų šaudmenys įprastai pasižymi dideliu galingumu ir jais gali būti šaudoma dideliais nuotoliais – iki 1 km ir toliau;

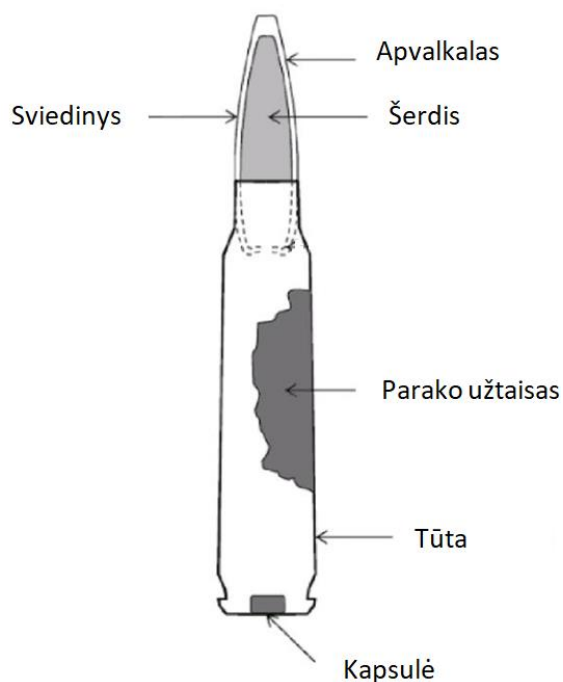
- pistoletų šaudmenys – pistoletų šaudmenys naudojami artimam mūšiu (iki 100 m), turintys trumpas tūtas ir atitinkamai mažesnius parako užtaisus. Pistoletų šaudmenų kalibrai įvairūs, mažiausi prasideda 4,25×10,27 mm ir didžiausi baigiasi 12,7×33 mm;
- kulkosvaidžių šaudmenys – tai kulkosvaidžiuose nuo seno naudojami šautuvų šaudmenys. Stambaus kalibro kulkosvaidžiai naudoja galingus šaudmenis, kurių kalibras viršija 12 mm. Pvz., rusiškas kalibras 12,7×108 mm, vakarietiškas 12,7×99 mm;
- revolverių šaudmenys – revolveriai dažnai naudoja tuos pačius šaudmenis, kaip ir pistoletai. Tačiau egzistuoja ir tik revolverių šaudmenys. Tokių šaudmenų pavyzdys yra 7,62×38 mm, 9,1×40 mm ir kiti.



26 pav. 9×19 mm Georg Liuger šaudmens pagrindiniai matmenys. Žalia spalva – pagrindinės kalibro sudedamosios dalys [19]

1.6.1. Šaudmens sandara

Šaulių ginklų šaudmenys sudaryti iš tūtos, kurioje subertas parako užtaisas, kurios dugne įtaisyta šaudmens kapsulė, o kaklelyje – sviedinys. Šaulių ginklų šaudmenų sviediniai sudaryti iš šerdies ir apvalkalo (27 pav.) [5].



27 pav. Šaulių ginklų šaudmens ir sviedinio sandara [5]

Sviedinys įprastai susideda iš šerdies ir apvalkalo. Pastarasis apsaugo sviedinio šerdį nuo statinio atsitrenkimo. Pats sviedinys būna įvairių formų ir dydžių. Dauguma šaulių ginklų sviedinių turi smailią nosį. Tokios formos sviedinio paskirtis – sumažinti aerodinaminį pasipriešinimą ir padidinti stabilumą [5].

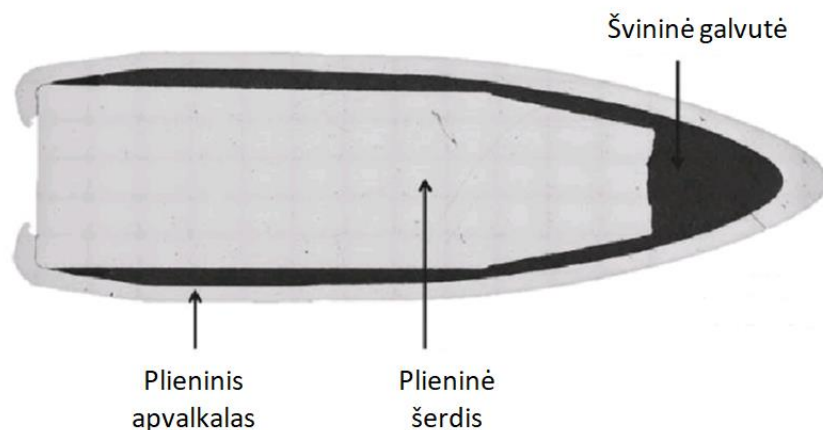
Svarbiausias sviedinių apibūdinimas yra, kaip ir šaudmenų – jų kalibras. Sviedinio kalibras dažniausiai matuojamas milimetrais, coliais, linijomis (1 linija = 2,54 mm), šimtosiomis (JAV) ir tūkstantosiomis (JK) colio dalimis. Šaulių ginklų kalibras yra 5,45–14,5 mm, artilerijos pabūklų – 20–420 mm [18].

1.6.2. Sviedinio apvalkalo poveikis įsiskverbimo metu

Pasak Paul Hazell, sviedinio apvalkalas yra skirtas dėl trijų priežasčių [5]:

1. tam, kad vidinės balistikos metu apsaugotų ginklo vamzdį nuo sviedinio šerdies;
2. tam, kad vidinės balistikos metu sviedinys kontaktuotų su graižtvomis, tačiau jos šerdis nebūtų pažeista;
3. tam, kad sviediniui suteiktų tinkamą formą išorinės balistikos metu, kuri optimizuotų sviedinio aerodinamiką.

Sviedinio apvalkalas taip pat gali paveikti įsiskverbimą – ypač keraminius šarvus. Paul Hazell teigia, kad nuo 1878 m buvo žinoma – sviediniai iš ketaus negali prasiskverbti pro kieto paviršiaus plokštes, kadangi tokie sviediniai yra trapūs ir suyra. Tuo tikslu buvo pristatyti sviediniai su galvute iš minkšto kaltinio plieno arba švino, kurie neleidžia sviediniui suirti skverbiantis į kietus paviršius (28 pav.) [5].

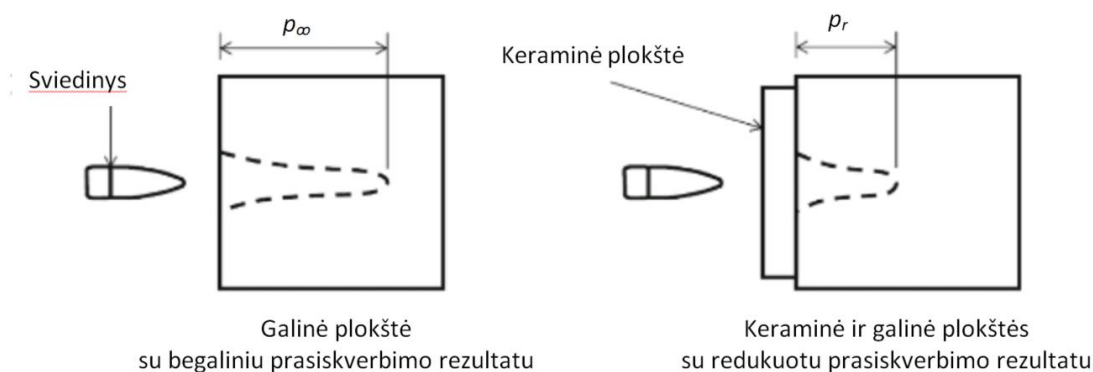


28 pav. Plieno šerdies ir apvalkalo sviedinys su švino galvute [5]

1.7. Balistiniai tyrimai

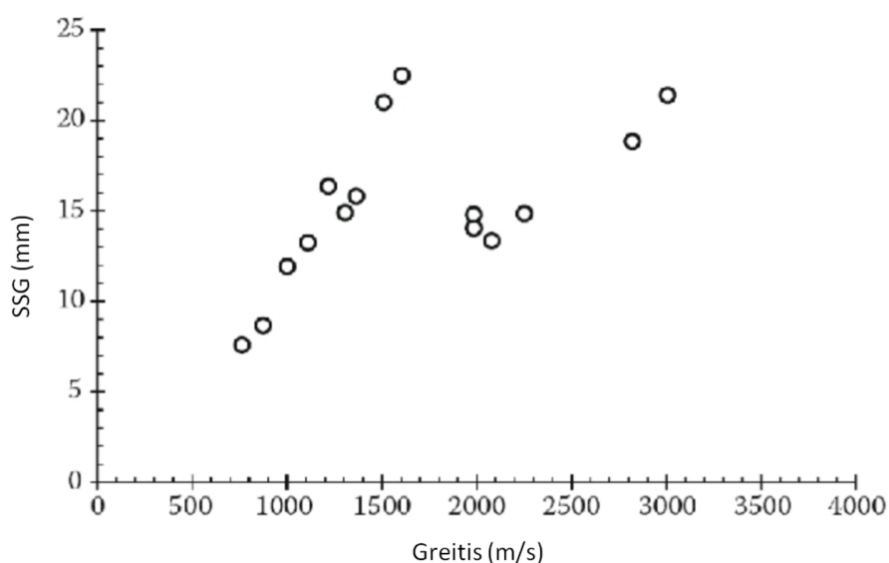
Yra daugybė metodų, kurie gali būti naudojami transporto priemonių šarvų struktūroms išbandyti. Vieni bandymų metodai sukurti siekiant išbandyti atskirus šarvų elementus, kiti – išbandyti visą platformą ir kaip pastaroji reaguoja į potencialią grėsmę. Norint suprasti galinės balistikos įsiskverbimo mechanizmus ir kaip optimizuoti šarvuotosios sistemos atskirų elementų storį ar kitas savybes, buvo sukurti keli balistiniai tyrimai. Paul Hazell išskiria 6 pagrindinius balistinius tyrimus [5]:

1. SSG tyrimas. Tai dažniausiai naudojamas bandymas, kuris atliekamas šaunant į šarvo plokštę, kuri yra pritvirtinta prie didelio gylio (teoriškai begalinio) kaliojo pagrindo. Rezultatas fiksuojamas matuojant įsiskverbimo gylį galinėje plokštėje ir palyginus jį su prasiskverbimo gyliu, nepritvirtinus šarvo plokštės (29 pav.). Šis SSG tyrimas sukurtas Rosenberg (1988), kaip būdas sumažinti keraminių šarvų įtempius, kurie naudojami laminuojant juos su kita šarvo medžiaga. Šio metodo pranašumas yra, kad jis yra salyginai pigus, kad nustatyti nagrinėjamos šarvo plokštės veikimo kriterijus. Tačiau metodas turi trūkumą – tyrimui naudojama galinė plokštė nėra šarvo sistemos sudedamoji dalis, todėl nagrinėjamo šarvo savybės gaunamos tik lyginamosios. Šios savybės gaunamos išmatavus prasiskverbimo sumažėjimą ir medžiagos tūrį, reikalingo prasiskverbimo gyliui sumažinti.



29 pav. Sviedinio skverbimosi gylio (SSG) tyrimo schema [5]

2. Ne linijinis SSG tyrimas. SSG tyrimai geriausiai skirti pateikti tam tikru greičiu sviediniui skverbiantis į šarvo plokštę momentiniu laiku. Keraminių plokščių atveju SSG tyrimo rezultatai bus linkę gerėti, nes plokštės storis padidės, kai smūgio paviršius bus perkeltas toliau nuo sąsajos tarp keraminės ir galinės plokščių. Esant dideliame sviedinio greičiui (>2000 m/s) ir kritinei KE, įmanoma, kad smūgis vien į galinę plokštę gali sukelti sviedinio irimą. 30 pav. pavaizduoti 6,35 mm kalibro rutulinio plieninio sviedinio, paveikusių aliuminio (AA 6082-T6) taikinį, tam tikru greičiu rezultatai. Rezultatuose matoma, kad sviediniui skriejant apie 1600 m/s greičiu SSG sumažėja. Taigi, matuojant balistinį efektyvumą plačiu greičio diapazonu, SSG ir greičio santykis yra gaunamas netiesinis.



30 pav. Sviedinio skverbimosi gylio (SSG) matavimų grafikas, 6,35 mm kalibro rutuliniam sviediniui dideliu greičiu atsitrenkus į aliuminio (AA 6082-T6) plokštę [5]

3. Sviedinio skverbimosi ribos tyrimas. Šis tyrimas paremtas v_{50} metodu, kuris dažniausiai taikomas visai šarvų sistemai tirti. Šio tyrimo pranašumas prieš SSG tyrimą yra toks, kad šiuo tyrimu išbandoma visa transporto priemonės šarvų sistema, o ne tik sistemos komponentas ir tai parodo šarvų sistemos efektyvumą. Tam, kad atlikti sviedinio skverbimosi ribos tyrimą reikalinga:

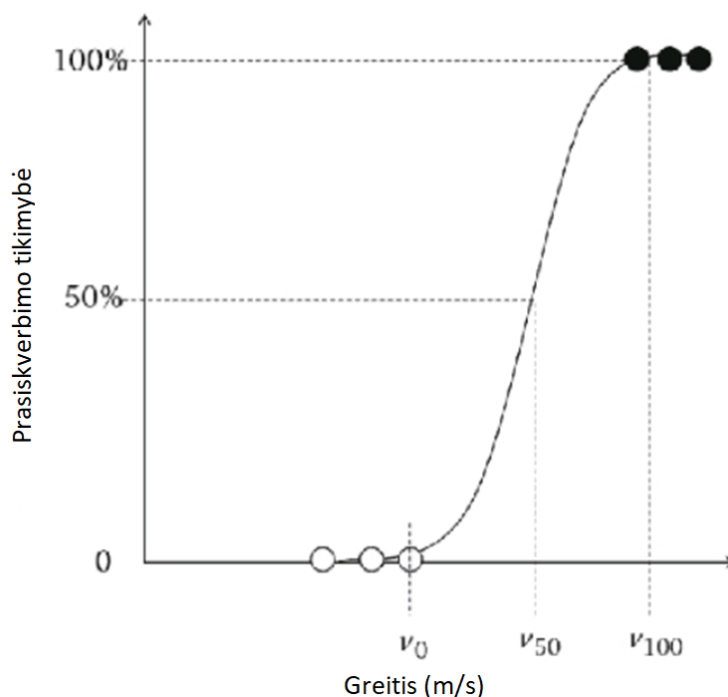
- šūvio trajektorija;
- iššauto sviedinio greičio matavimo sistema;
- priemonė, galinti pakeisti sviedinio judėjimo greitį, t. y. keičianti sviedinio pradinės balistikos parametrus.

Šio tyrimo pagrindas yra tas, kad tam tikroje taikinio plokštėje, siauras greičio diapazonas turės įvairius rezultatus (5 lentelė).

5 lentelė. Sviedinio skverbimosi ribos tyrimo rezultatai. Čia PP – pilnas prasiskverbimas; DP – dalinis prasiskverbimas [5]

Tyrimo Nr.	Smūgio greitis (m/s)	Rezultatas
1	750	DP
2	720	PP
3	735	PP
4	749	DP
5	734	PP
6	748	PP
7	763	DP

Esant greičiui, kuris vadinamas v_0 visi sviediniai yra sustabdyti taikinio plokštės, o greičiui esant v_{100} atvirkščiai – visi sviediniai prasiskverbia pro taikinio plokštę. Taigi, tarpe tarp v_0 ir v_{100} yra tikimasi pamatyti įvairius rezultatus, kai dalis sviedinių yra sustabdyti, o kita dalis nesustabdyta. Ir žinoma, galimas v_{50} sviedinio greitis, kur galima tikėtis, kad 50 % sviedinių bus sustabdyti taikinio plokštės, o kiti 50 % sviedinių prasiskverbs pro taikinio plokštę (31 pav.).

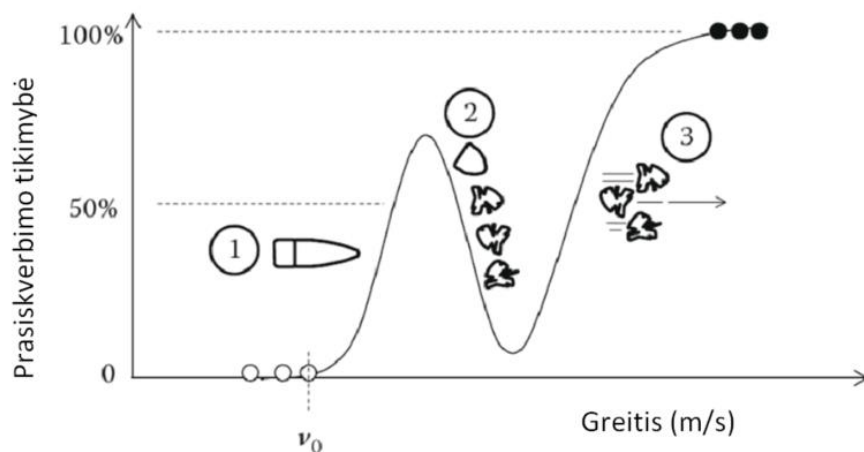


31 pav. Sviedinio skverbimosi ribos grafikas [5]

Taigi, esant sviediniui tyriamajame greičio diapazone yra visiškai įmanoma, kad vieno sviedinio, kurį sustabdo taikinio plokštė, smūgio greitis yra didesnis nei panašaus sviedinio, kuris prasiskverbia pro taikinio plokštę, smūgio greitis. Pagrindinė to priežastis yra ta, kad sviedinio skverbimosi ribos tyrime beveik neįmanoma susieti kiekvieno kintamojo. Net ir atrodant visiškai identiškai esamai aplinkai, sviediniams ar taikiniui, gali būti nedideli skirtumai:

- sviedinio geometrija;

- sviedinio šerdies masė;
 - sviedinio trajektorijos kampas smūgio vietoje;
 - taikinio plokštės mikrostruktūra ties smūgio tašku;
 - taikinio plokštės storis smūgio vietoje ir pan.
4. Sviedinio skverbimosi kitimo tyrimas. Jeigu sviedinio skverbimosi ribos tyrime susidaro dvi ir daugiau balistinių ribų kreivių, tai šiame tyrime tikimybė yra dar platesnė, dėl atsiradusių papildomų kintamųjų. Tai gali atsirasti dėl kelių priežasčių, kurios dažniausiai siejamos su keraminėmis šarvo plokštėmis. Sviedinio skverbimosi kitimas pavaizduotas 32 pav.



32 pav. Sviedinio skverbimosi taikinyje kitimo grafikas [5]

- Iš pradžių, esant $v = v_0$, kaip ir anksčiau, nei vienas sviedinys neprasiskverbia pro taikinio plokštę. Padidinus sviedinio greitį atsirandą tikimybė sviediniui prasiskverbti pro taikinio plokštę (32 pav. 1). Sviediniui pasiekus greitį kai jis pradeda irti, tikimybė sviediniui prasiskverbti mažėja (32 pav. 2). Tai vyksta iki kol susiformavuoja atskiri sviedinio fragmentai, kurie juda pakankamai greitai, kad galėtų toliau skverbtis į taikinio plokštę (32 pav. 3).
5. Pramušimo tyrimas. Šiame tyrime atsižvelgiama į tai, jog jeigu sviedinio smūgio į taikinio plokštę metu nei sviedinys, nei taikiny nesuyra, skverbimosi procese galima atsižvelgti į neapdorotos energijos balansą. Tyrimui atlikti imamas sviedinys, kurio masė yra m_i , o smūgio į taikinio plokštę greitis – v_{100} . Tada sviedinys prasiskverbia pro taikinio plokštę ir galininėje jos plokštumoje sviedinio greitis yra v_r , o masė – m_r . Sviedinio greitis gali būti matuojamas greičio matavimo sistema, esančia prieš ir po taikinio plokštės. Procentinė sviedinio KE perduota skverbimosi metu išreiškiama:

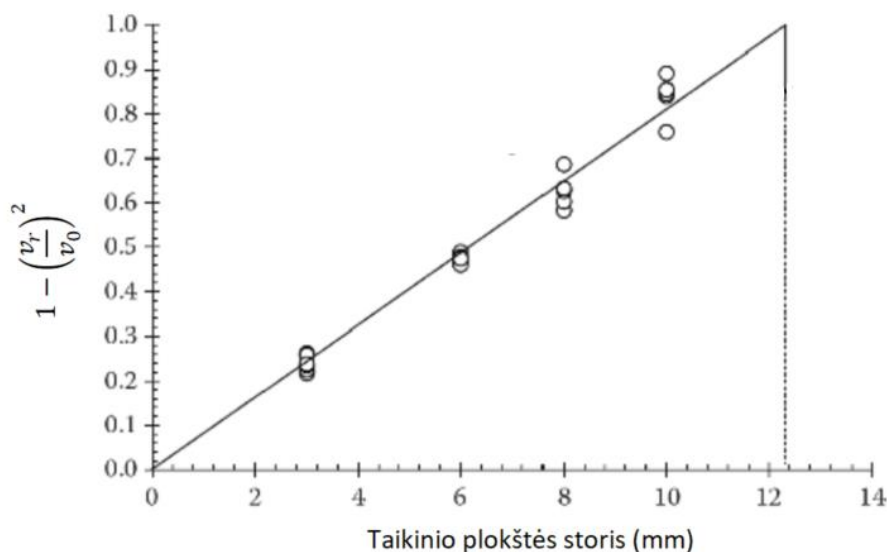
$$\%KE = \left(\frac{\frac{1}{2}m_i v_0^2 - \frac{1}{2}m_r v_r^2}{\frac{1}{2}m_i v_0^2} \right) \times 100; \quad (19)$$

Jeigu skverbimosi metu sviedinio masė išlieka pastovi ($m_i = m_r$), išraiška gali būti supaprastinta:

$$\%KE = \left(\frac{v_0^2 - v_r^2}{v_0^2} \right) \times 100 = \left[1 - \left(\frac{v_r}{v_0} \right)^2 \right] \times 100; \quad (20)$$

Ralybėje sviedinio masė skverbimosi metu bus prarandama, kadangi sviedinio apvalkalas ar šerdies galvutė yra gaminamos iš santykinai minkštos medžiagos, kurios skverbimosi metu atsiskiria nuo sviedinio.

Lyginant sviedinio procentinę KE su taikinio plokštės storio, kai imami keli taikinio plokštės storiai, yra numatoma taikinio plokštės prasiskverbimo riba. 33 paveikslėlyje pavaizduoti sviedinio skverbimosi rezultatai.



33 pav. Sviedinio KE priklausomybė nuo taikinio plokštės storio. Čia naudojama 5,56×45 mm sviedinys ir plieno plokštė 43A ($\gamma = 300$ Mpa) [5]

Esant mažiems taikinių plokščių storiams, sviedinio perduotos dalinės KE laikosi mažose grupėse, tuo tarpu didelio storio taikinio plokštėse duomenys pasiskirsto. Nubrėžus vidurkio liniją per gautus rezultatus, galima pagrįstai numatyti kokio storio taikinio plokštė sustabdytų sviedinį. Šiuo atveju sviedinio greitis yra apie 920 m/s, o taikinio plokštės storis šiek tiek daugiau nei 12 mm.

6. Švytuoklinis balistikos tyrimas. Šio tyrimo sistemą sudaro balistinė švytuoklė, sviedinio gaudymo vamzdis ir šovos mechanizmas su sviediniu. Balistinė švytuoklė yra prietaisas, kuris yra įtaisytas už taikinio ir matuoja sviedinio pagreitį prieš ir po prasiskverbimo, pro taikinį. Plieninis sviedinio gaudymo vamzdis, imituoja taikinį ir yra pakabintas ties sviedinio skverbimosi trajektorija. Prieš atliekant pagrindinius eksperimentus, švytuoklė kalibruojama šaunant įvairius žinomos masės sviedinius kintančiu (matuojamu) greičiu. Kai sviedinys pasiekia sviedinio gaudymo vamzdį, švytuoklė siūbuoja. Tokiu būdu švytuoklė kalibruojama pagal sviedinio greitį. Taigi, žinant sviedinio greitį prieš ir po skverbimosi į taikinį (šiuo atveju sviedinio gaudymo vamzdį), galima nustatyti sviedinio impulsą perduodamą taikiniui.
7. Atvirkštinis balistikos tyrimas. Šis tyrimas dažniausiai naudojamas norint nustatyti atskirų sviedinio dalių (pvz. apvalkalo) įtaką sviedinio skverbimuisi į taikinio plokštę. Taikant šią techniką, taikinio plokštė atitinkamu greičiu juda į įtvirtintą sviedinį, kuris šiame tyrime tampa taikinys. Toks tyrimas turi kelis privalumus:
 - lengviau nustatyti norimas sviedinio ir taikinio plokštės orientacijos savybes;
 - laboratorijose galima atlikti balistinius bandymus su didelio kalibro sviediniais;
 - galima išvengti išorinės balistikos sukeltų nepageidaujamų savybių, pvz. sviedinio sukimasis ir nukrypimas nuo šūvio trajektorijos;
 - galima tirti atskirtas sviedinio dalis, t. y. šerdį, jo galvutę ar apvalkalą.

2. Sviedinio skverbimosi į nuožulnius šarvus tyrimas

Karinės transporto priemonės iki 5 t yra nešarvuojamos (būna išimčių), nes tokios transporto priemonės tampa sunkios ir nemanevringos. Pagal atliktą analizę galima teikti, kad praktiškiausi negamyklinio šarvavimo būdai transporto priemonėms iki 5 t, gali būti nuožulnių šarvų arba šarvų su tarpais pritaikymas. Tokių šarvų pritaikymo parinkimas yra efektyvus, dėl naudojamų medžiagų ir technologinio paruošimo gerų balistinių savybių, lyginant su kitais šarvavimo būdais. Todėl toliau bus atliekamas sviedinio skverbimosi į nuožulnius šarvus ir nuožulnius šarvus su tarpu tyrimas.

2.1. Tiriamų objektų sąlygos ir eiga

Tyrimo sąlygos: 7,62 mm kalibro plieninio apvalkalo su švino galvute sviedinys [26] atskirai skverbiasi į tris taikinius. Sviedinio svoris apie 7,9 g. Pirmas taikiny (pirmas tiriamas objektas) yra iš įrankinio plieno S-7, kurio išmatavimai 40×40×4 mm. Antras taikiny (antras tiriamas objektas) yra iš aliuminio 7039, kurio išmatavimai 40×40×4 mm. Trečias taikiny (trečias tiriamas objektas) sudarytas iš dviejų plieno S-7 plokščių, kurių išmatavimai yra 40×40×2 mm (kiekvienos atskirai) ir tarp kurių yra 3 mm oro tarpas. Simuliacijoje sviedinys sukdamasis apie savo ašį 18850 rad/s (3000 aps/s) atakuoja taikinio plokštę 715 m/s greičiu. Pirmam tiriamam objektui simuliacija atliekama keturis kartus, kai skverbimosi pradžioje, sviedinio atakos kampai – 20°, 30°, 40° ir 50°. Antram tiriamam objektui simuliacija atliekama tris kartus, kai skverbimosi pradžioje, sviedinio atakos kampai – 50°, 60° ir 70°. Trečiam tiriamam objektui simuliacija atliekama du kartus, kai skverbimosi pradžioje, sviedinio atakos kampai – 30° ir 40°.

Taikinių plokštės ir atskirtos sviedinio dalys modeliuojamos pagal Johnson-Cook medžiagos plastiškumo modelį, kuris apima priklausomybę nuo įtempių, deformacijos ir temperatūros. Johnson-Cook plastiškumo modelis yra empirinis ir išreiškiamas lygtimi [20]:

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (21)$$

Čia A, B, C, n ir m – medžiagos konstantos; $\bar{\epsilon}^p$ – plastinė deformacija; $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ – plastinės deformacijos norma; $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ – darbinė temperatūra; $\dot{\epsilon}_0$ - deformacijos norma; T_0 – tyrimo aplinkos temperatūra; T_m - lydimosi temperatūra.

Taip pat naudojama Johnson-Cook medžiagos lūžio modelis, kuriuo įvertinami medžiagos lūžio įtempiai. Johnson-Cook lūžio modelis išreiškiamas lygtimi [20]:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*][1 + D_5 T^*] \quad (22)$$

Čia D_i , $i = 1, \dots, 5$ – medžiagos konstantos; σ^* - slėgio padalinto iš efektyvių įtempių santykis

Medžiagos lūžis įvyksta, kai parametras D pasiekia reikšmę 1:

$$D = \sum t_i \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f} \quad (23)$$

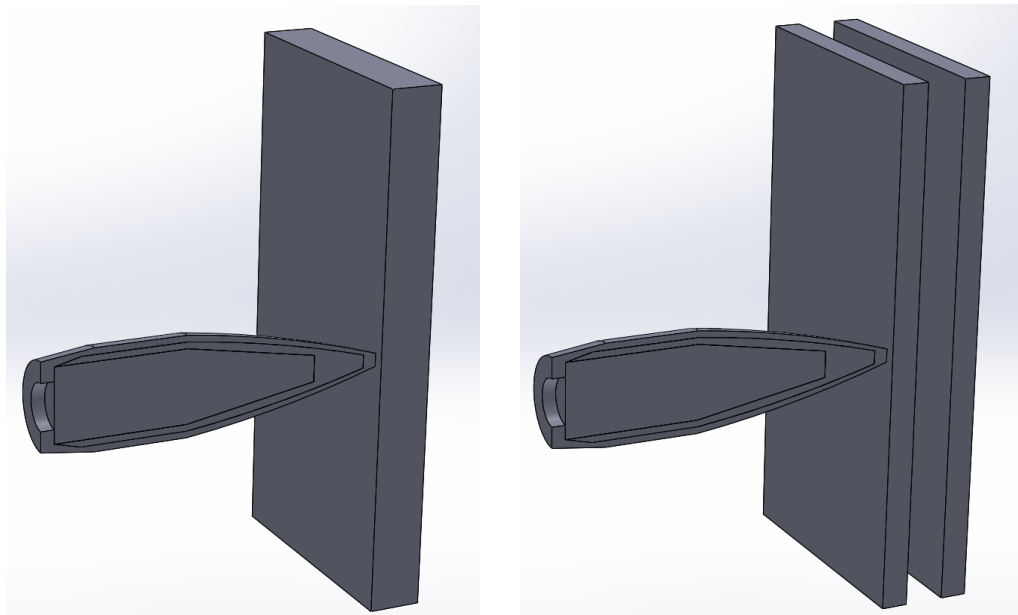
Atliekamiems tyrimams sviedinio ir įrankinio plieno plokštės reikšmės paimtos iš Marvin Becker atlikto sviedinio skverbimosi į plieno plokštę tyrimo [20]. Aliuminio plokštės reikšmės paimtos iš D. R. Scheffler ir L. S. Magness atlikto sviedinio skverbimosi į aliuminio plokštės tyrimo [25]. Reikšmės pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. Tiriamų objektų medžiagų reikšmės pagal Johnson-Cook medžiagos plastiškumo ir lūžio modelius [20]

Objekto komponentas	m	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	A [MPa]	B [MPa]	n	$\dot{\epsilon}_0 [s^{-1}]$	C
Plieno S-7 plokštė	1,058	7850	844	1000	0,15	1e-3	0,01
Aliuminio lydinio 7039 plokštė	1	2770	337	343	0,41	1	0,01
Sviedinio šerdis	1	7840	500	1000	0,2	1e-3	0,008
Sviedinio galvutė	1	11340	240	300	1,0	5e-4	0,1
Sviedinio apvalkalas	1,68	8960	90	505	0,42	5e-4	0,01
Objekto komponentas	$T_m [^{\circ}C]$	$T_0 [^{\circ}C]$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Plieno S-7 plokštė	1526,85	19,85	0,00	2,12	-1,45	0,00	-0,68
Aliuminio lydinio 7039 plokštė	820	19,85	-0,77	1,45	-0,47	0,00	1,6
Sviedinio šerdis	1526,85	19,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sviedinio galvutė	54,35	19,85	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
Sviedinio apvalkalas	1082,85	19,85	0,54	4,89	-3,03	0,014	1,12

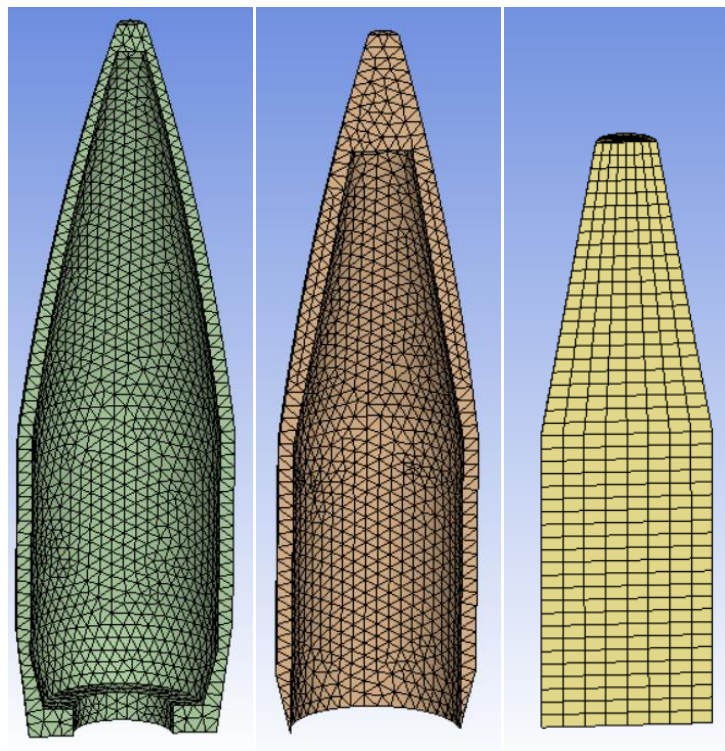
Čia A, B, C, n, m ir D_i , $i = 1, \dots, 5$ – medžiagos konstantos; ρ – tankis; T_0 – tyrimo aplinkos temperatūra; T_m - lydimosi temperatūra.

Trimačio sviedinio ir taikinių modeliai sukurti “SolidWorks” programinėje įrangoje. Tam, kad optimizuoti skaičiavimus, sviedinio ir taikinių modeliai sukurti pusę projekcijos (34 pav.). Sukurti modeliai perkialiami į “ANSYS” programinės įrangos “Explicit Dynamics” terpę.



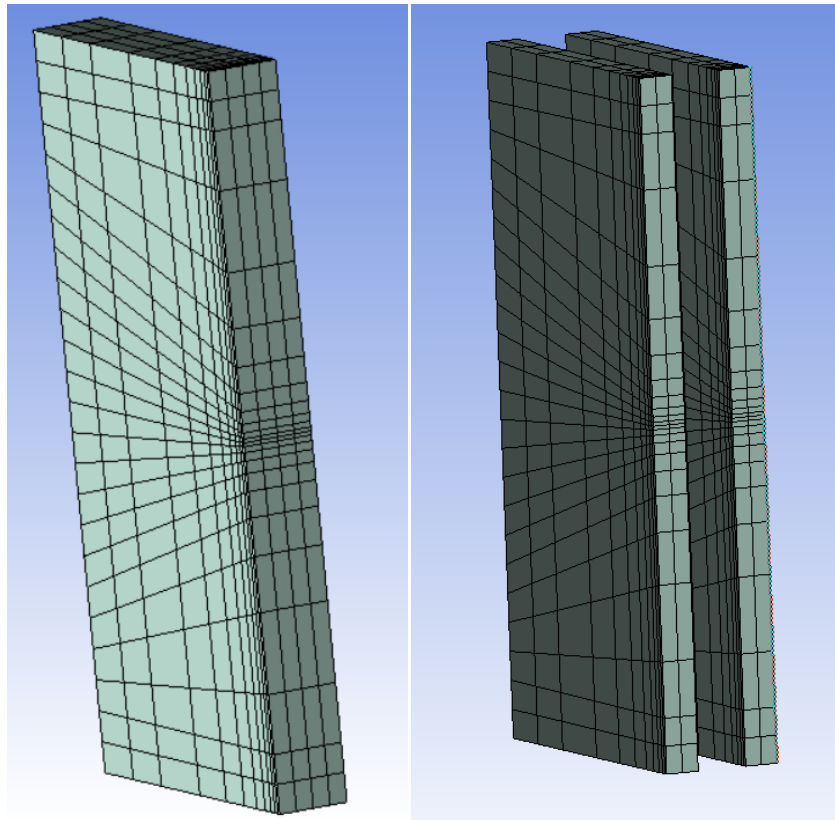
34 pav. Sviedinio ir taikinių modeliai

“ANSYS” programinėje įrangoje sumodeliuoti tiriamų objektų baigtinių elementų modeliai. Sviedinio apvalkalo ir galvutės baigtiniai elementai yra tetraedro formos, o šerdies baigtiniai elementai heksaedro formos (35 pav.). Visi sviedinio baigtiniai elementai yra vienodo ilgio briaunų, kurių ilgis yra 0,45 mm. Sviedinio apvalkalas sudarytas iš 11 926 baigtinių elementų, galvutė iš 10 631 baigtinių elementų, šerdis iš 2 530 baigtinių elementų, o visas sviedinys sudaro 25 087 baigtinius elementus.



35 pav. Sviedinio baigtinių elementų modelis

Plieno ir aliuminio plokščių, kurios sudaro tiriamų objektų taikinius, baigtiniai elementai yra heksaedro formos, kurie yra $1 \times 2 \times 2$ mm išmatavimų (36 pav.). Kad gauti tikslesnius rezultatus, ties plokščių viduriu, kur skverbiasi sviedinys, baigtiniai elementai sutankinti. 4 mm storio įrankinio plieno ir aliuminio lydinio plokštės atskirai sudarytos iš 1 056 baigtinių elementų, o dvi plieno plokštės po 2 mm storio bendrai sudaro taip pat 1 056 baigtinius elementus.

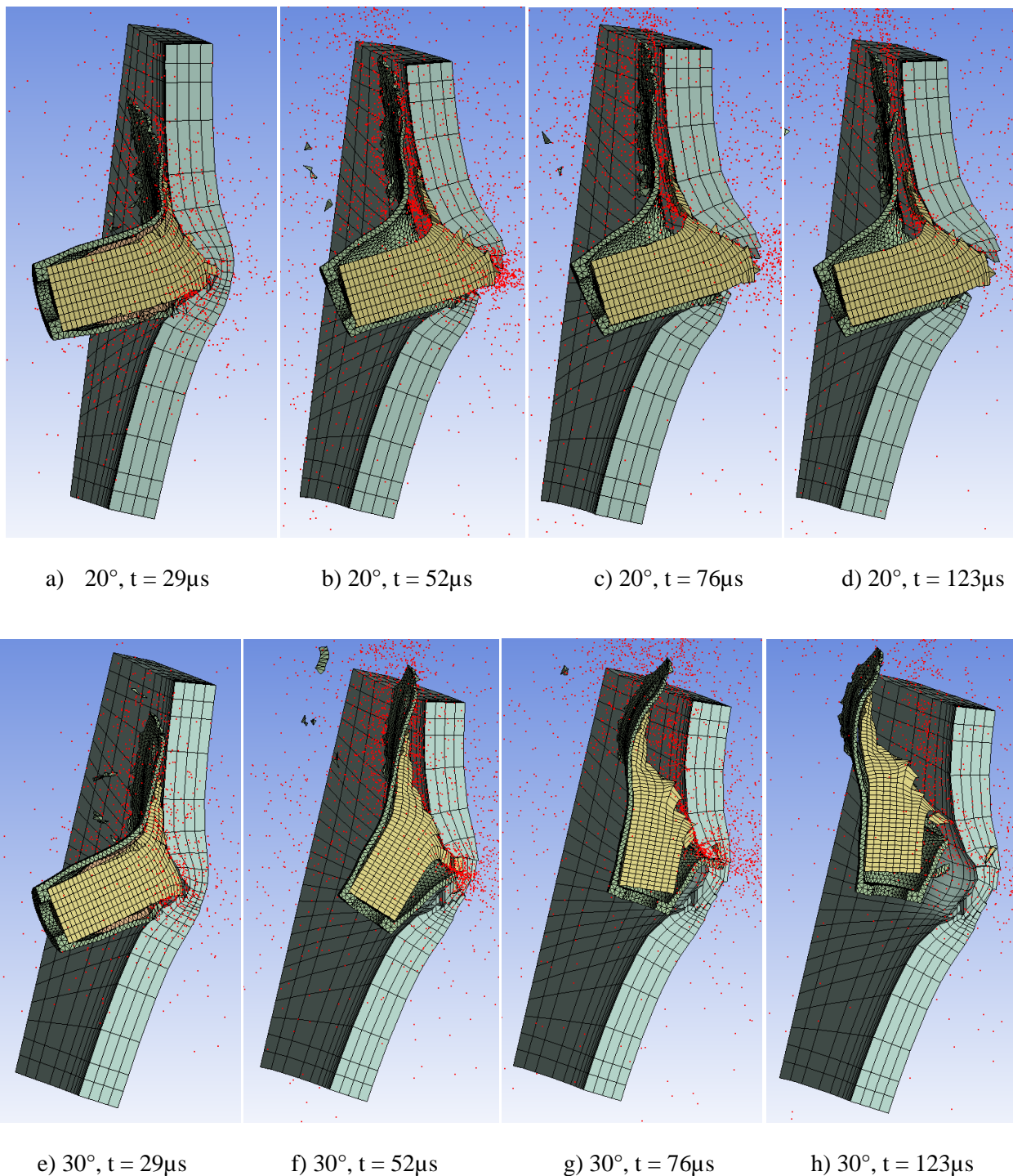


36 pav. Taikinių baigtinių elementų modeliai

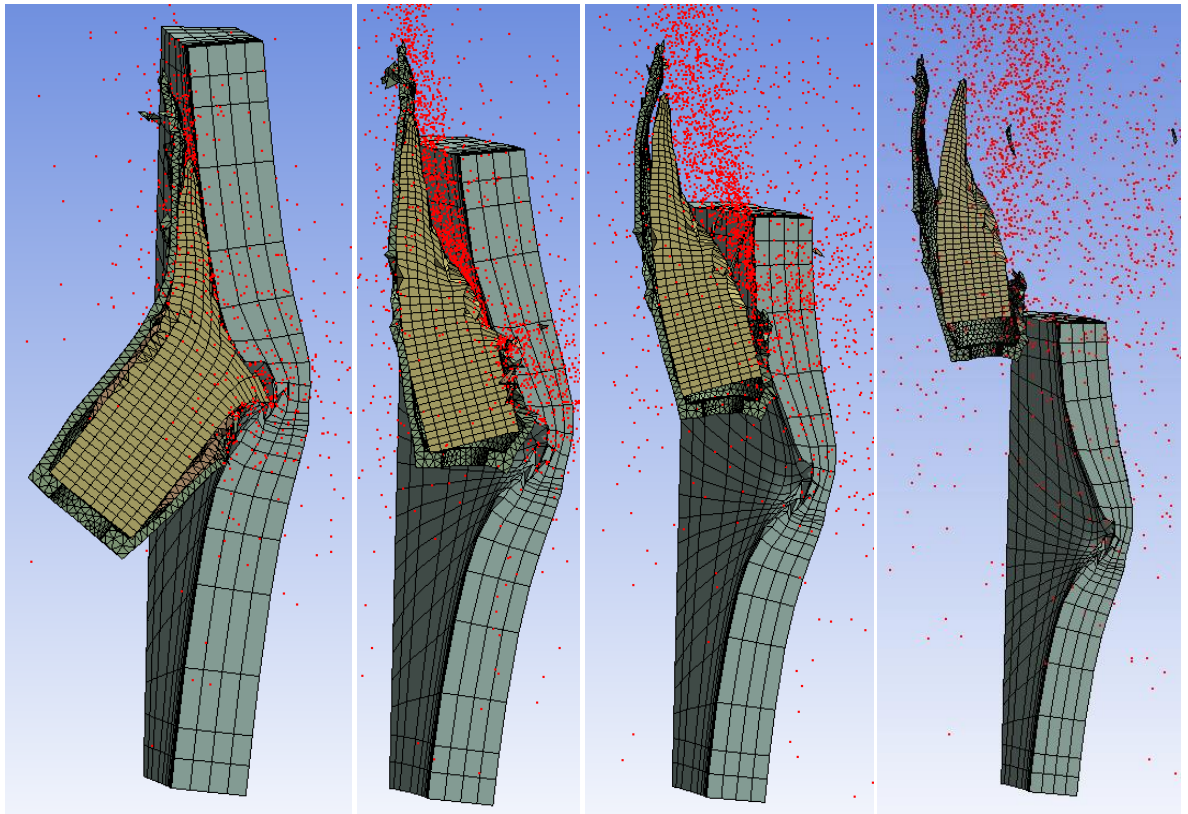
Kad gauti tikslius tyrimų objektų rezultatus, prieš atliekant skaičiavimus, sviediniui ir taikiniams nurodomos simetrijos ašys, kadangi suprojektuoti tiriami objektai yra tik po pusę projekcijos. Taip pat taikiniai yra standžiai įtvirtinti iš šonų. Skaičiavimai atliekami pagal duotas sąlygas, taikant Johnson-Cook medžiagų modelius.

3. Sviedinio skverbimosi į nuožulnius taikinius tyrimo rezultatai ir jų pritaikymas

Pirmo tiriamo objekto, t. y. 7,62 mm kalibro sviedinio skverbimosi į 4 mm storio įrankinio plieno plokštę, keičiant sviedinio atakos kampą kas 10° nuo 20° iki 50° , vaizdinių rezultatai pateikti 37 pav. ir 38 pav. Grafinės sviedinio greičio ir energijos priklausomybės nuo laiko ir taikinio plastinių deformacijų priklausomybės nuo laiko pateiktos 1-ame priede.



37 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm plieno plokštę esant 20° ir 30° sviedinio atakos kampams. Čia a), e) – $29\mu\text{s}$; b), f) – $52\mu\text{s}$; c), g) – $76\mu\text{s}$ ir d), h) – $123\mu\text{s}$

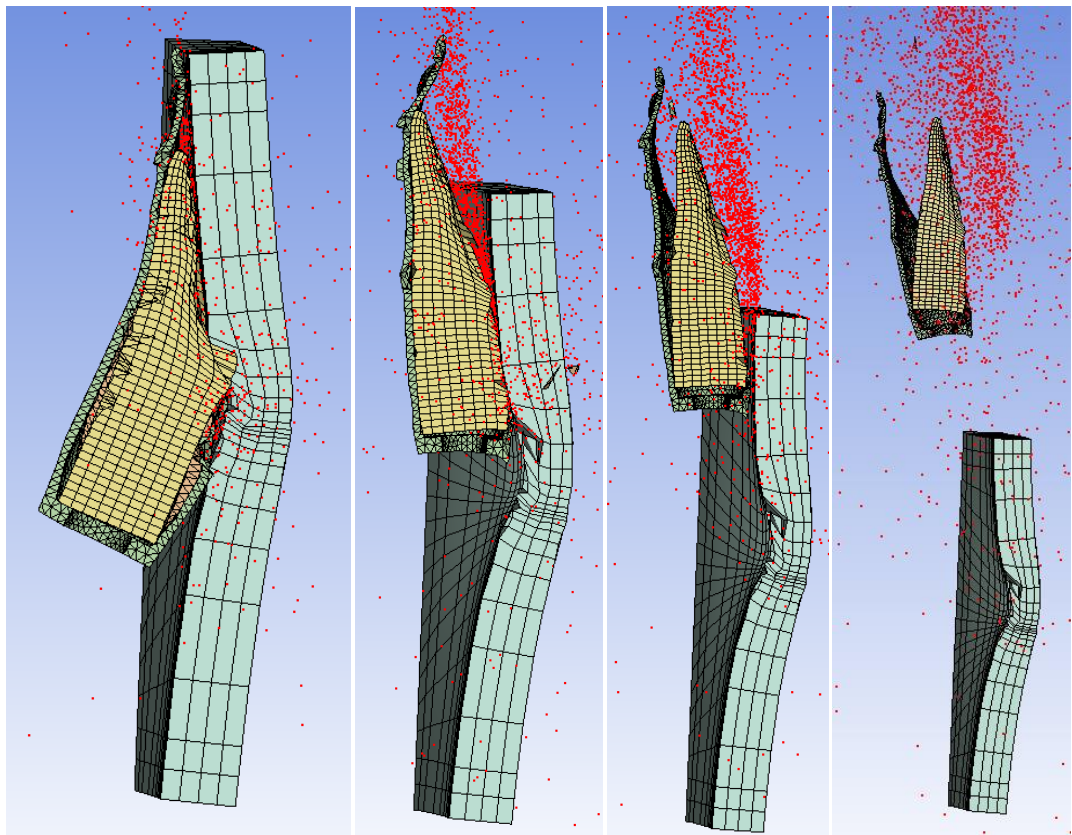


a) 40° , $t = 29 \mu\text{s}$

b) 40° , $t = 52 \mu\text{s}$

c) 40° , $t = 76 \mu\text{s}$

d) 40° , $t = 123 \mu\text{s}$



e) 50° , $t = 29 \mu\text{s}$

f) 50° , $t = 52 \mu\text{s}$

g) 50° , $t = 76 \mu\text{s}$

h) 50° , $t = 123 \mu\text{s}$

38 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm plieno plokštę esant 40° ir 50° sviedinio atakos kampams. Čia a) – 29 μs ; b) – 52 μs ; c) – 76 μs ir d) – 123 μs

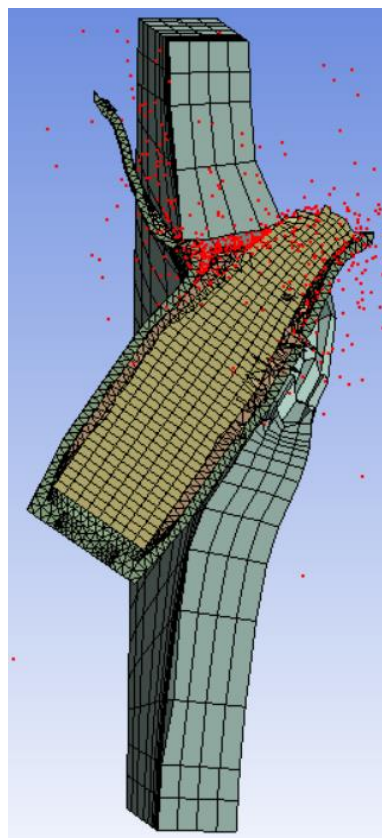
Iš pirmo tiriamo objekto vaizdinių rezultatų matoma, kad sviedinys prasiskverbia visiškai, arba prasiskverbia dalinai pro taikinį, kai sviedinio atakos kampas $\leq 20^\circ$. Sviedinio atakos kampui esant $\geq 30^\circ$, sviedinys rikošetuoja nuo taikinio atakos kryptimi. Iš vaizdinių rezultatų matoma, kad kuo didesnis sviedinio atakos kampas, tuo didesnė tikimybė sviediniui rikošetuoti, taip sudarant mažesnę žalą taikiniui.

Pirmo tiriamo objekto tikslūs rezultatus galima matyti pateiktuose grafikuose (1 priedas). Sviediniui esant 20° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki 30 m/s ir sumažėjo 96 % arba 24-iais kartais, sviediniui esant 30° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki 80 m/s ir sumažėjo 89 % arba 9-iais kartais, sviediniui esant 40° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki 280 m/s ir sumažėjo 61 % arba 2,6-iais kartais, sviediniui esant 50° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito apytiksliai iki 420 m/s ir sumažėjo 42 % arba 1,7-iais kartais. 47 pav. ir 50 pav. grafikuose matoma, kad kuo lengviau sviedinys rikošetuojasi, tuo jo greitis išlieka didesnis. 50 pav. grafike tikėtina, kad rikošetavus sviediniui ir pakeitus jam atakos kampą, jis tampa nestabilus, todėl toliau sviedinio greitis tampa nestabilus ir svyruoja nuo 410 m/s iki 440 m/s.

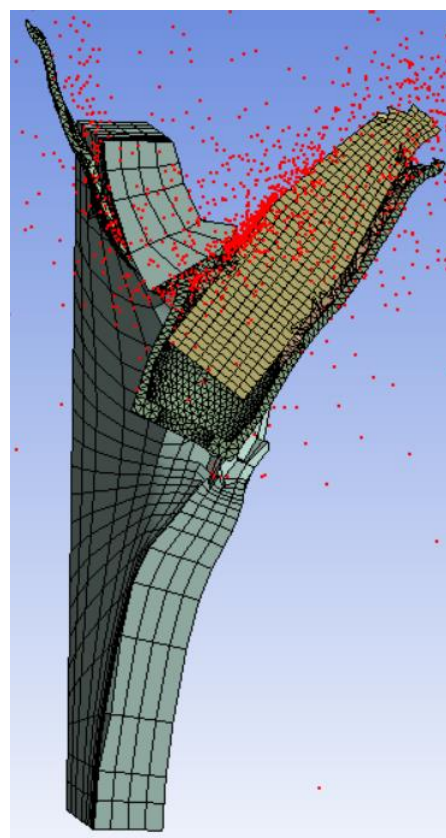
Visais bandymo atvejais, sviedinio skverbimosi pradžioje, sviedinys pasiekia 898 J energiją. Sviediniui esant 20° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 141 J ir sumažėjo 84 % arba 6,4-iais kartais, sviediniui esant 30° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 161 J ir sumažėjo 80 % arba 5-iais kartais, sviediniui esant 40° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 295 J ir sumažėjo 67 % arba 3-iais kartais, sviediniui esant 50° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 499 J ir sumažėjo 50 % arba 2 kartais. 48 pav. ir 51 pav. grafikuose matoma, kad kuo lengviau sviedinys rikošetuoja, tuo jo energija išlieka didesnė. 45 pav. grafike matomas staigus energijos šuolis, kai sviedinys iš mažiausios turimos reikšmės 161 J momentiškaiai pasiekia apie 790 J. Galima teigti, kad taip įvyksta, dėl dalinio sviedinio prasiskverbimo, kai sviediniui pasisukus apie savo ašį statmenai skriejimo trajektorija, arba stipriai jam deformavusis – sviedinys, arba jo dalis toliau skverbiasi į taikinį. Tokiais atvejais yra atliekamas sviedinio skverbimosi kitimo tyrimas.

Pirmu bandymu, kai sviedinio atakos kampas yra 20° , deformacijos reikšmė siekia 1,066 mm/mm, tai reiškia, kad taikinio plokštė yra deformuojama negryžtamai. Kitais bandymo atvejais deformacijos reikšmė nesiekia 1 mm/mm.

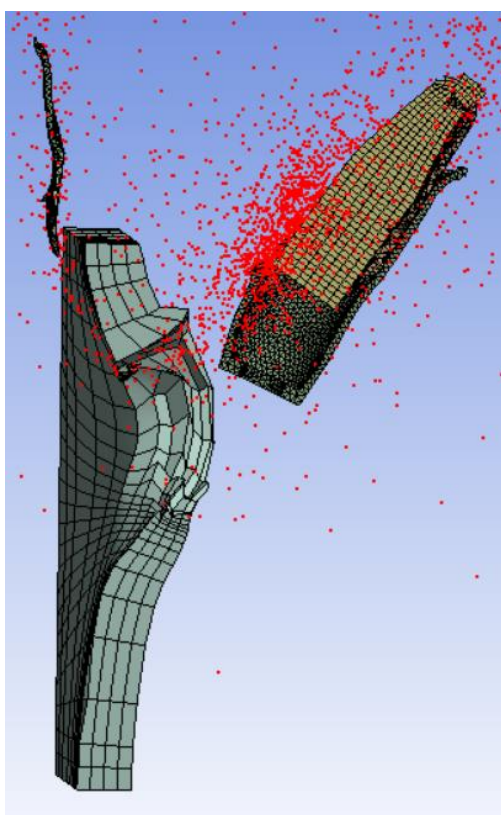
Antro tiriamo objekto, t. y. 7,62 mm kalibro sviedinio skverbimosi į 4 mm storio aliuminio lydinio 7039 plokštę, esant sviedinio atakos kampams 50° , 60° ir 70° , vaizdinių rezultatai pateikti 39 pav. ir 40 pav. Grafinės sviedinio greičio ir energijos priklausomybės nuo laiko ir taikinio plastinių deformacijų priklausomybės nuo laiko pateiktos 2-ame priede.



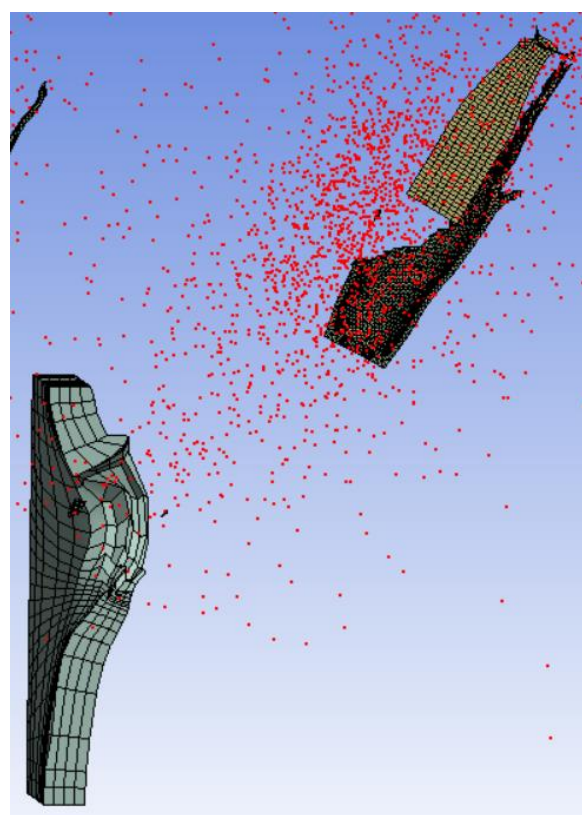
a) 50° , $t = 29 \mu\text{s}$



b) 50° , $t = 52 \mu\text{s}$

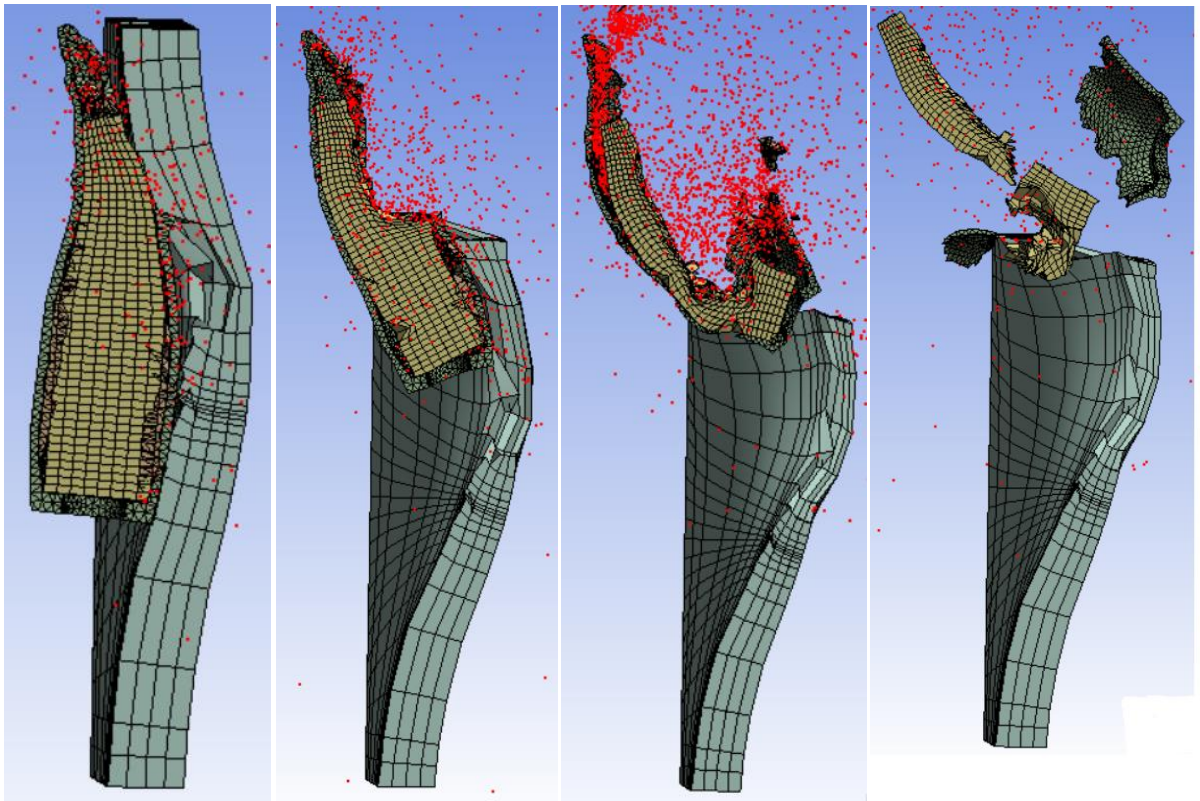


c) 50° , $t = 76 \mu\text{s}$



d) 50° , $t = 123 \mu\text{s}$

39 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm aliuminio lydinio plokštę esant 50° sviedinio atakos kampamui. Čia a) – $29 \mu\text{s}$; b) – $52 \mu\text{s}$; c) – $76 \mu\text{s}$ ir d) – $123 \mu\text{s}$

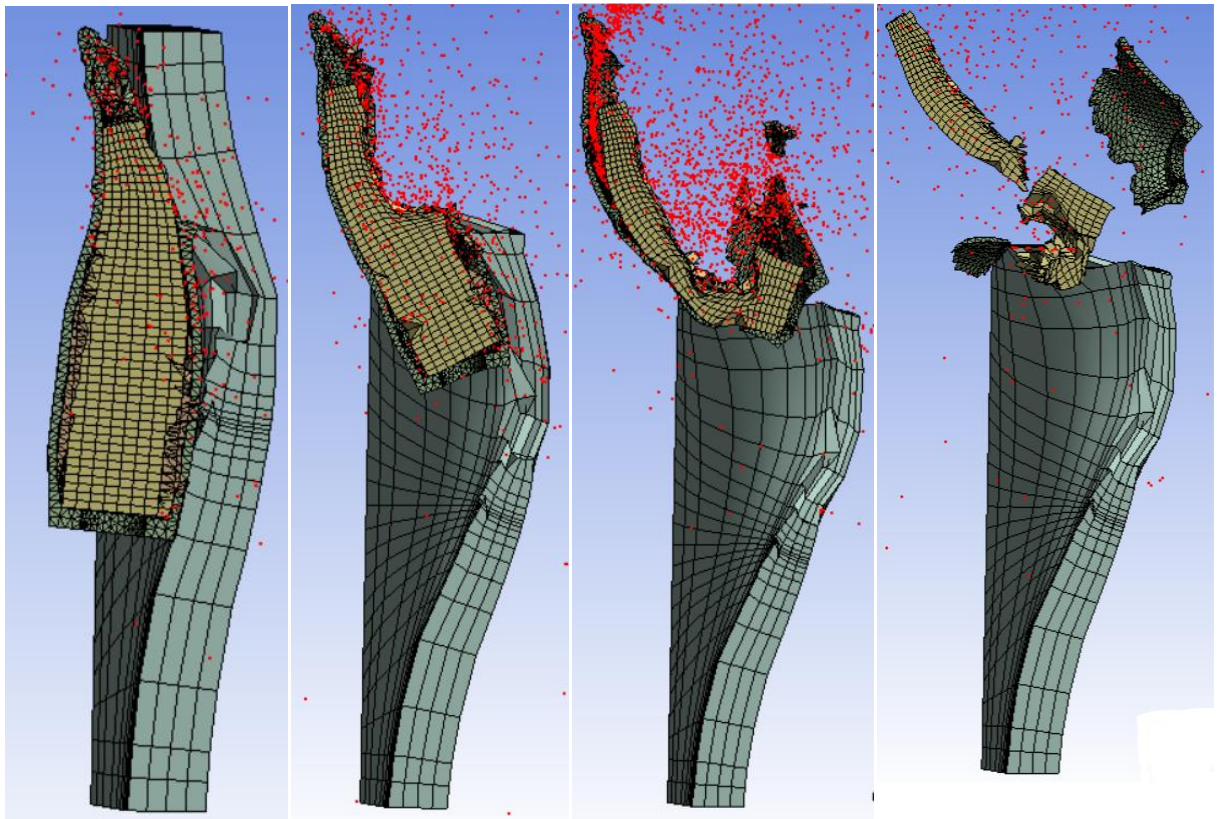


a) 60° , $t = 29 \mu\text{s}$

b) 60° , $t = 52 \mu\text{s}$

c) 60° , $t = 76 \mu\text{s}$

d) 60° , $t = 123 \mu\text{s}$



e) 70° , $t = 29 \mu\text{s}$

f) 70° , $t = 52 \mu\text{s}$

g) 70° , $t = 76 \mu\text{s}$

h) 70° , $t = 123 \mu\text{s}$

40 pav. Sviedinio skverbimasis į 4 mm aliuminio lydinio plokštę esant 60° ir 70° sviedinio atakos kampams. Čia a), e) – $29 \mu\text{s}$; b), f) – $52 \mu\text{s}$; c), g) – $76 \mu\text{s}$ ir d), h) – $123 \mu\text{s}$

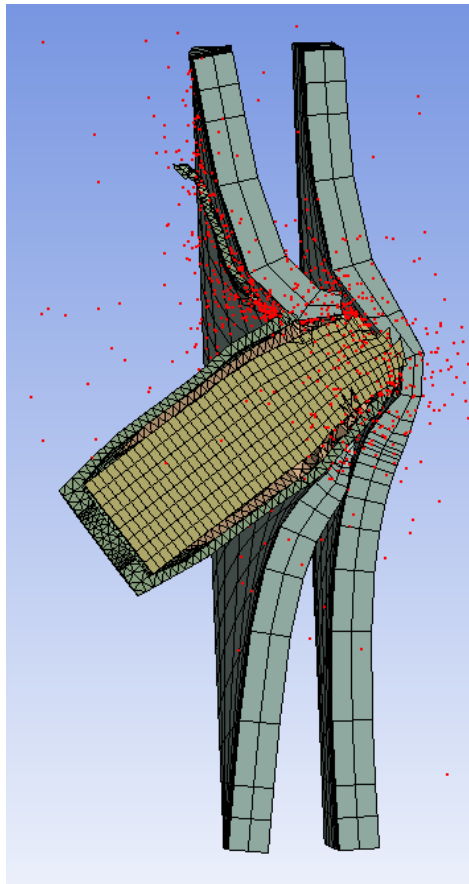
Iš antro tiriamo objekto vaizdinių rezultatų matoma, kad sviedinys prasiskverbia visiškai, kai sviedinio atakos kampas $\leq 50^\circ$. Sviedinio atakos kampui esant $\geq 60^\circ$, sviedinys rikošetuoja nuo taikinio atakos kryptimi. Iš vaizdinių rezultatų matoma, kad sviedinio atakos kampui esant $\geq 60^\circ$, sviedinys rikošetuodamas suįra.

Antro tiriamo objekto tikslius rezultatus galima matyti pateiktuose grafikuose (2 priedas). Sviediniui esant 50° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki apie 615 m/s ir sumažėjo 14 % arba 1,1-u kartu, sviediniui esant 60° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki 66 m/s ir sumažėjo 92 % arba 10,8-iais kartais, sviediniui esant 70° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito taip pat iki 66 m/s ir sumažėjo 92 % arba 10,8-iais kartais.

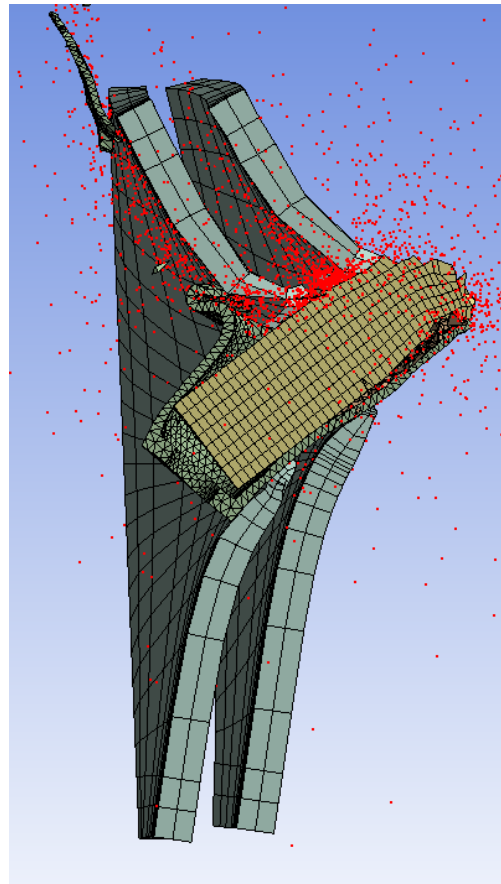
Visais bandymo atvejais, sviedinio skverbimosi pradžioje, sviedinys pasiekia 898 J energiją. Sviediniui esant 50° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 571 J ir sumažėjo 37 % arba 5,1-u kartu, sviediniui esant 60° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 803 J ir sumažėjo 11 % arba 1,1-u kartu, tačiau sviediniui rikošetavus, jo energija vėl pakyla iki apie 2014 J. Sviediniui esant 70° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu išlieka tokia pat kaip sviediniui skverbiantis 60° atakos kampui. Staigų energijos šuolį dviem paskutiniais bandymais galima paaiškinti, kaip sviedinio suįrimą ir jo atskirtų dalių skriejimą toliau. Nors sviedinio atskirtų dalių energija yra didelė, tačiau čia sviedinio dalių greitis yra mažas, todėl galima priimti, kad pastarieji nėra pavojingi. Kad teisingai įvertinti kaip atskiros sviedinio dalys skverbtūsi į kūnus, reiktų papildomų sviedinio dalių skverbimosi tyrimų.

Visais bandymo atvejais taikinys pasiekia apie 1 mm/mm plastinės deformacijos reikšmę. Tačiau didėjant sviedinio atakos kampui matoma kaip deformacijos reikšmė artėja prie 1 mm/mm. Taip pat palyginus vaizdinius rezultatus su plastinės deformacijos prilausomybės nuo laiko grafikais, galima teigti, kad nors taikinio plokštės ir yra deformuojamos, tačiau sviedinys vistiek rikošetuoja nuo taikinio

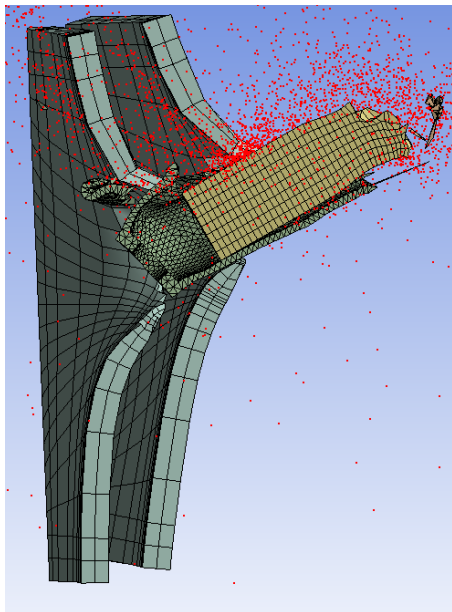
Trečio tiriamo objekto, t. y. 7,62 mm kalibro sviedinio skverbimosi į dvi įrankinio plieno S-7 plokštes po 2 mm storio, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas, esant sviedinio atakos kampams 30° ir 40° , vaizdinių rezultatai pateikti 41 pav. ir 42 pav. Grafinės sviedinio greičio ir energijos priklausomybės nuo laiko ir taikinio plastinių deformacijų priklausomybės nuo laiko pateiktos 3-iame priede.



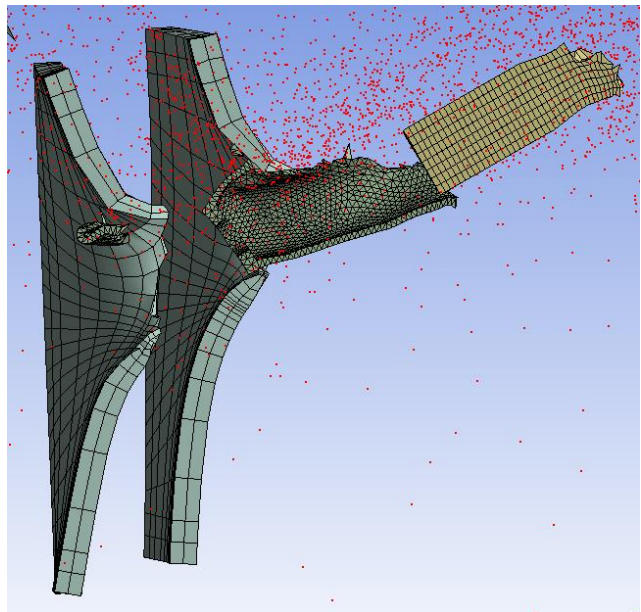
a) 30° , $t = 29\mu\text{s}$



b) 30° , $t = 52\mu\text{s}$

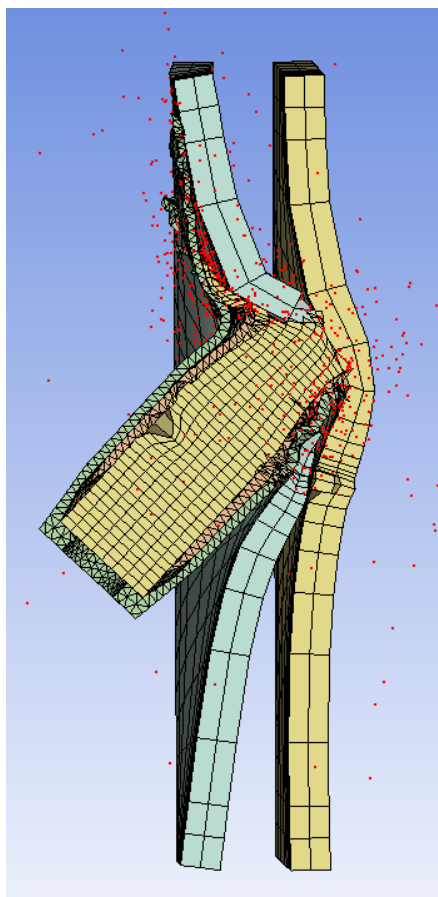


c) 30° , $t = 76\mu\text{s}$

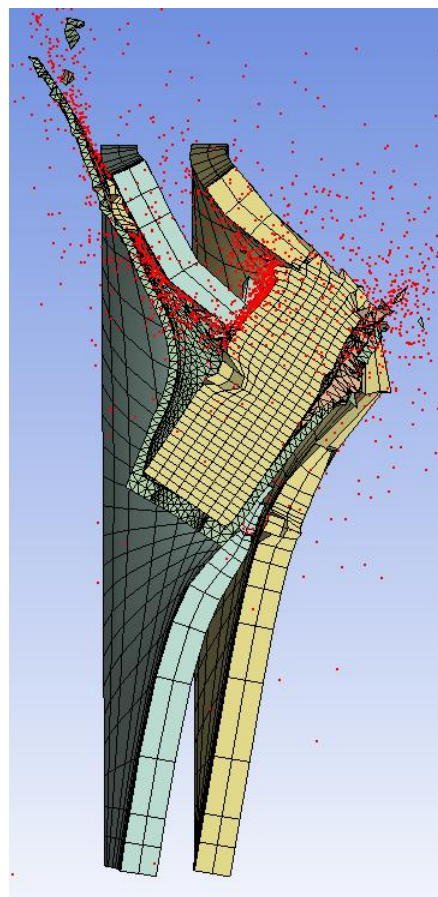


d) 30° , $t = 123\mu\text{s}$

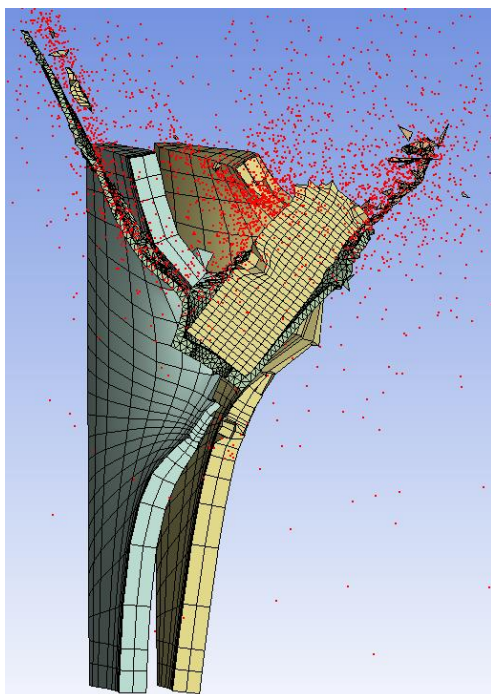
41 pav. Sviedinio skverbimasis į dvi plieno plokštes po 2 mm storio, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas, esant 30° sviedinio atakos kampui. Čia a) – 29 μs ; b) – 52 μs ; c) – 76 μs ir d) – 123 μs



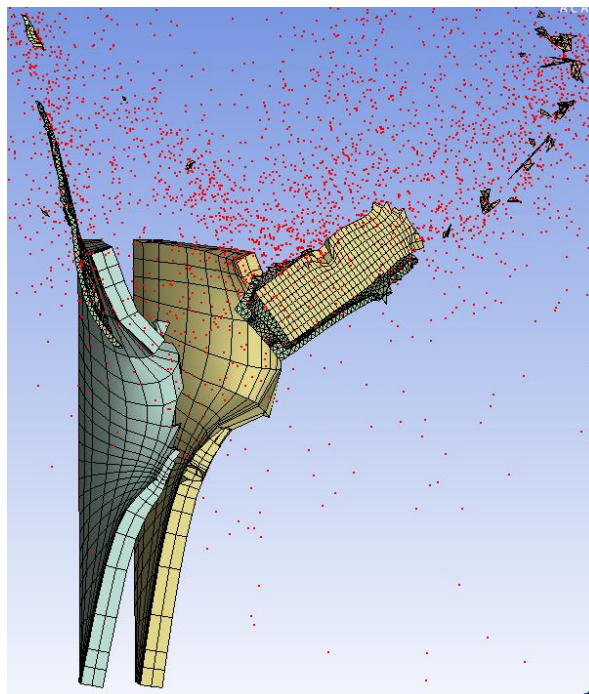
a) 40° , $t = 29\mu\text{s}$



b) 40° , $t = 52\mu\text{s}$



c) 40° , $t = 76\mu\text{s}$



d) 40° , $t = 123\mu\text{s}$

42 pav. Sviedinio skverbimasis į dvi plieno plokštes po 2 mm storio, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas esant, 40° sviedinio atakos kampui. Čia a) – 29 μs ; b) – 52 μs ; c) – 76 μs ir d) – 123 μs

Iš trečio tiriamo objekto vaizdinių rezultatų matoma, kad abiem bandymo atvejais sviedinys prasiskverbia, nepriklausomai nuo sviedinio atakos kampo.

Trečio tiriamo objekto tikslūs rezultatus galima matyti pateiktuose grafikuose (3 priedas). Sviediniui esant 30° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki maždaug 390 m/s ir sumažėjo apie 50 % arba 2-iem kartais, sviediniui esant 40° atakos kampui, jo greitis skverbimosi metu nukrito iki maždaug 260 m/s ir sumažėjo apie 66 % arba 3-ais kartais. Taip pat 64 pav. ir 67 pav. pavaizduotuose grafikuose matoma, kad kai sviedinys pasiekia antrą taikinio plokštę, jo greitis tampa nestabilus ir svyruoja maždaug nuo 380 m/s iki 410 m/s pirmu bandymu, ir maždaug nuo 250 m/s iki 280 m/s antru bandymu. Antru bandymu, kai sviedinio atakos kampas yra 40° , sviedinio greitis pamažu didėja. Galima daryti prielaidą, kad taip vyksta dėl to, kad po pirmojo taikinio plokštės sviedinys pakeičia atakos kampą, antra taikinio plokštė tuoj pat vėl keičia sviedinio atakos kampą ir pastarojo skriejimo trajektorija tampa nestabili. Sviediniui stabilizavusis ir sumažėjus aerodinaminiam pasipriešinimui, sviedinio greitis nežymiai padidėja.

Visais bandymo atvejais, sviedinio skverbimosi pradžioje, sviedinys pasiekia 898 J energiją. Sviediniui esant 30° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 287 J ir sumažėjo 66 % arba 3-is kartais, sviediniui esant 40° atakos kampui, jo energija skverbimosi metu nukrito iki 265 J ir sumažėjo 70 % arba 3,3-iais kartais.

Pirmu bandymu taikinio plokštė pasiekia 1,0022 mm/mm deformacijos reikšmę, o antru bandymu pasiekia tik 0,99847 mm/mm reikšmę. Iš grafinių vaizdinių matoma, kad sviedinys abiejais bandymo atvejais lengvai prasiskverbia pro taikinio plokštes, todėl galima daryti prielaidą, kad antru bandymu deformacijos reikšmė nesiekia 1 mm/mm dėl skaičiavimo paklaidos

Išanalizavus tiriamų objektų rezultatus, galima teigti, kad įrankinio plieno S-7 ir aliuminio lydinio 7039 nuožulnūs šarvai yra efektyvesni už nuožulnius su tarpais, tačiau plonesnius įrankinio plieno S-7 šarvus. Pritaikant nuožulnius šarvus karinių transporto priemonių iki 5 t šarvavimui galima išskirti šiuos tyrimo gautus rezultatus:

1. įrankinio plieno S-7 plokščių nuožulnumas turi būti ne mažesnis kaip 30° kampas, o aliuminio lydinio 7039 plokščių nuožulnumas turi būti ne mažesnis kaip 60° kampas tikėtino sviedinio atakos kampo atžvilgiu;
2. įrankinio plieno S-7 plokščių nuožulnumas turi būti nukreiptas į apačią, kadangi rikošetavusio sviedinio greitis ir KE salyginai lieka didelės reikšmės;
3. kad šarvo plokštė nebūtų lengvai plastiškai deformuojama, šarvo plokštė turi būti kuo kietesnės medžiagos.

Apibendrinimas

Renkant karinėms transporto priemonėms šarvavimui naudojamas medžiagas, svarbiausias kriterijus yra mechaninės savybės: stiprumas, tamprumas, plastiškumas ir kietumas. Populiariausios šarvavimui naudojamos metalų medžiagos: 50CrV4, Hardox 450, 7039-T6, AZ31B-H24 ir Ti-6Al-4V. Populiariausios šarvavimui naudojamos pluoštinių audinių medžiagos: Kevlaras, S-2 ir E-stiklo pluoštai, Dyneema SK60, Spectra S900-5600, bazalto ir HT pluoštai. Populiariausios šarvavimui naudojamos keramikos ir stiklo medžiagos: safyras, keraminis stiklas ir A1ON.

Karinės transporto priemonės yra šarvuojamos naudojant 6 šarvavimo tipus atskirai arba kombinuojant juos tarpusavyje. Galimi šarvavimo tipai naudojant: homogeninius šarvus, nuožulnius šarvus, šarvus su tarpais, laminuotus šarvus, reaktyvius ir improvizuotus šarvus. Šarvavimo tipai yra kombinuojami ne tik tarpusavyje, tačiau ir su transporto priemonės konstrukcija, t.y. karinės transporto priemonės konstrukcija ir šarvavimo tipas yra kombinuojami tarpusavyje ir priklauso nuo transporto priemonės paskirties ir užtikrinamo apsaugos lygio reikalavimo. Apsaugos lygiai standartizuojami NATO standartais STANAG 4686 ir STANAG 4569.

Balistika skirstoma į dvi pagrindines dalis: vidinę balistiką ir išorinę balistiką. Šūvis balistikoje tyrinėjamas kaip labai greitos parako cheminės energijos transformacijos į šiluminę, paskui į sviedinio judėjimo energiją procesas. Tačiau dažniausiai balistikoje yra tyrinėjama galinė balistika. Sviedinio skverbimosi procesas yra įtakojamas medžiagos, į kurią sviedinys skverbiasi savybių. Taip pat šį procesą įtakoja ir sviedinio medžiaga, geometrija, smūgio greitis ir sviedinio svoris. Andrius Vilkauskas daktaro disertacijoje tema „Mažo kalibro kulų balistinių procesų modeliavimas ir tyrimas“ apibendrina galinės balistikos tyrimus taip: „Atkreipiamas dėmesys į tai, kad šioje srityje vyrauja empiriniai tyrimo metodai, o skaitiniai metodai dar tik pradedami plačiau taikyti“ [27].

Išanalizavus Marvin Becker, D.R. Scheffler, L.S. Magnes, Leopoldo Carbajal, Jovan Jovicic, Helga Kuhlmann ir Andriaus Vilkausko atliktus galinės balistikos tyrimus, ištirtas sviedinio skverbimasis į skirtingus taikinius, esant skirtingiems sviedinio atakos kampams. Skirstant ar 7,62 mm kalibro plieninio apvalkalo sviedinys prasiskverbia pro taikinio plokštę ar rikošetuoja nuo jo, kai pastarojo skverbimosi pradžios greitis yra 715 m/s gauti rezultatai:

1. sviedinio skverbimasis į 4 mm storio įrankinio plieno S-7 plokštę, esant sviedinio atakos kampams:
 - 20° – sviedinys prasiskverbia;
 - 30°, 40° ir 50° – sviedinys rikošetuoja.
2. sviedinio skverbimasis į 4 mm storio aliuminio lydinio 7039 plokštę, esant sviedinio atakos kampams:
 - 50° – sviedinys prasiskverbia;
 - 60° ir 70° – sviedinys rikošetuoja.
3. sviedinio skverbimasis į dvi 4 mm storio įrankinio plieno S-7 plokštes, tarp kurių yra 3 mm oro tarpas, esant sviedinio atakos kampams:
 - 30° ir 40° – sviedinys prasiskverbia.

Išvados

Darbo tikslas pasiektas ir karinėms transporto priemonėms iki 5 t ne gamykliniam šarvavimui nuo šaulių ginklų kriterijai nustatyti.

- Karinių šarvuotų transporto priemonių naudojamų šarvų analizė padėjo išsiaiškinti, kad negamykliniam šarvavimui turi būti parinktos medžiagos, kurias galima lengvai apdirbti ir yra kietos, tačiau ne trapios.
- Palyginus karinių šarvuotų transporto priemonių konstrukcijas ir naudojamus šarvavimo būdus iškelta hipotezė, kad nuožulnūs šarvai gali būti efektyvūs transporto priemonėms iki 5 t, kuri vėliau pasiteisino.
- Atlikus sviedinio skverbimosi tyrimus, nustatyta, kad:
 - 4 mm storio įrankinio plieno S-7 plokštė atlaiko sviedinio skverbimąsi jį rikošetuodama, kai plieno plokštės nuožulnumo kampas yra $\geq 30^\circ$ sviedinio atakos kampo atžvilgiu;
 - 4 mm storio aliuminio lydinio 7039 plokštė atlaiko sviedinio skverbimąsi jį rikošetuodama, kai aliuminio lydinio plokštės nuožulnumo kampas yra $\geq 60^\circ$ sviedinio atakos kampo atžvilgiu;
 - dvi įrankinio plieno S-7 plokštės, kurių storis yra po 2 mm ir tarp kurių yra 3 mm tarpas, neatlaiko sviedinio skverbimosi, kai plokščių nuožulnumo kampai yra 30° ir 40° sviedinio atakos kampo atžvilgiu.
- Pritaikius atlikto tyrimo rezultatus, nustatytas papildomas karinių transporto priemonių šarvavimo kriterijus – įrankinio plieno S-7 šarvo plokščių nuožulnumas turi būti nukreiptas žemyn.

Dėl pasiekto iškelto darbo tikslo ir tinkamai atlikto tyrimo, šis projektas yra sėkmingas. Projekto rezultatai gali būti naudingi studentams, nagrinėjantiems balistiką ir įvairiems kariuomenės atstovams, perkantiems arba modernizuojantiems kariuomenės transporto priemones.

Taip pat svarbu paminėti, kad šis tyrimas nėra baigtinis ir norint tinkamai šarvuoti karines transporto priemones iki 5 t, reikėtų atlikti papildomus tyrimus naudojant daugiau šaulių ginklų sviedinių tipų, naudojant skirtingas taikinių medžiagas ir tyrimus su sprogmenimis ir jų sukeltomis sprogimo bangomis. Taip pat reikalingi transporto priemonių dinamikos tyrimai.

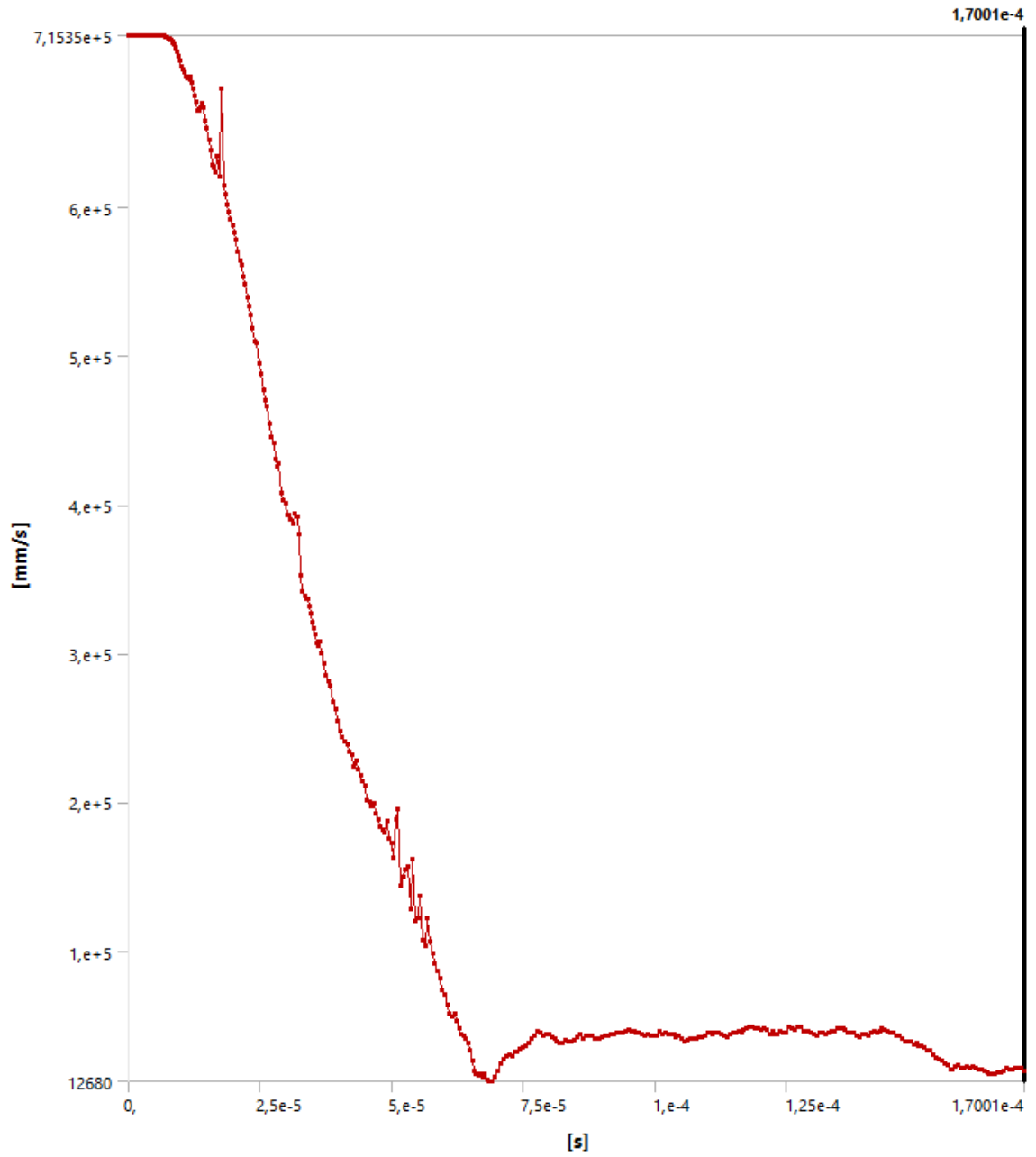
Literatūros sąrašas

1. ABRAMAVIČIENĖ, Danutė ir Viktoras KASULAITIS. Konstrukcinės ir eksploatacinės medžiagos. Vilnius: 2012. ISBN 978-9955-706-74-8
2. CIMPOERU, S. J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. Australia: Land Division, Defence Science and Technology Group, 2016. AR-016-722
3. KAMEL, Hisham. Draft: studying the trade-off between protection and mobility of armored vehicles [interaktyvus]. Cairo: Military Technical College, Egyptian Armed Forces, 2017 [žiūrėta 04 19]. IMECE2017-72531. prieiga per: <https://www.researchgate.net/>
4. JIM, Arthur ir Srouch IAN. The Science of Armour Materials [interaktyvus]. Cambridge: Elsevier Science & Technology, 2016 [žiūrėta 2020 05 05]. E-ISBN 9780081007112. Prieiga per: <https://vb.ktu.edu>
5. HAZELL, Paul J. Armour: Materials, Theory, and Design [interaktyvus]. CRC Press, 2015 [žiūrėta 2020 05 05]. ISBN1482238306, 9781482238303. Prieiga per: <https://books.google.lt/>
6. JAČIAUSKAS, Ignotas ir Aleksandras Venckus. Balistika: mokomoji knygelė. 2-oji laida. Vilnius: Lietuvos karo akademija, 1999. ISBN 9986-565-97-9
7. PEJSA, Arthur J. Modern Practical Ballistics. 2-oji laida. Kenwood: 1991. ISBN 0-96212776-3-7.
8. The state of Israel Ministry of Defence Rafael Armament Development Authority (ISR). An armour assembly for armoured vehicles [interaktyvus]. Išradėjai: Yami Carmel TARSI, David Kiryat Bialik BEN-MOSHE, Gideon Kiryat Tivon ROSENBERG. Int. Cl: F41H 5/04. Europos patentas EP 0 209 221 A1. 1987 01 21. Europos patentų biuras [žiūrėta 2020 04 19]. Prieiga per: Europos leidinių serverį.
9. STANAG 4686 (Edition 1). Performance levels of defensive aids suites (DAS) for armoured vehicles. NATO Standartas. Briuselis: NATO standartizacijos agentūra, 2012.
10. STANAG 4569. Protection levels for occupants of logistic and light armored vehicles. NATO Standartas. Briuselis: NATO standartizacijos agentūra, 2012.
11. AEP-55 (Volume 1 Edition 1). Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles. NATO Standartas. Briuselis: NATO standartizacijos agentūra.
12. NATO Standardization Office [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020 04 19]. Prieiga per: <https://www.nato.int/>
13. Lietuvos Respublikos Terminų bankas [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020 04 22]. Prieiga per: <http://terminai.vlkk.lt/>
14. Relative Armor Thickness [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020 04 22]. Prieiga per: <https://panzerworld.com/>
15. Types of Armour [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020 04 22]. Prieiga per: <https://norfolktankmuseum.co.uk/>
16. MILLER, Stephen. Future Directions for Armoured Fighting Vehicles, Military technology [interaktyvus]. Bona: Mönch Verlagsgesellschaft mbH. 2017 [žiūrėta 2020 05 01]. Prieiga per: <http://www.armateconline.com/>
17. Ginklų rūšys ir jų klasifikavimas [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2020 04 24]. Prieiga per: <https://www.de2.lt/>
18. Kalibras [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020 04 24]. Prieiga per: <https://www.vle.lt/>

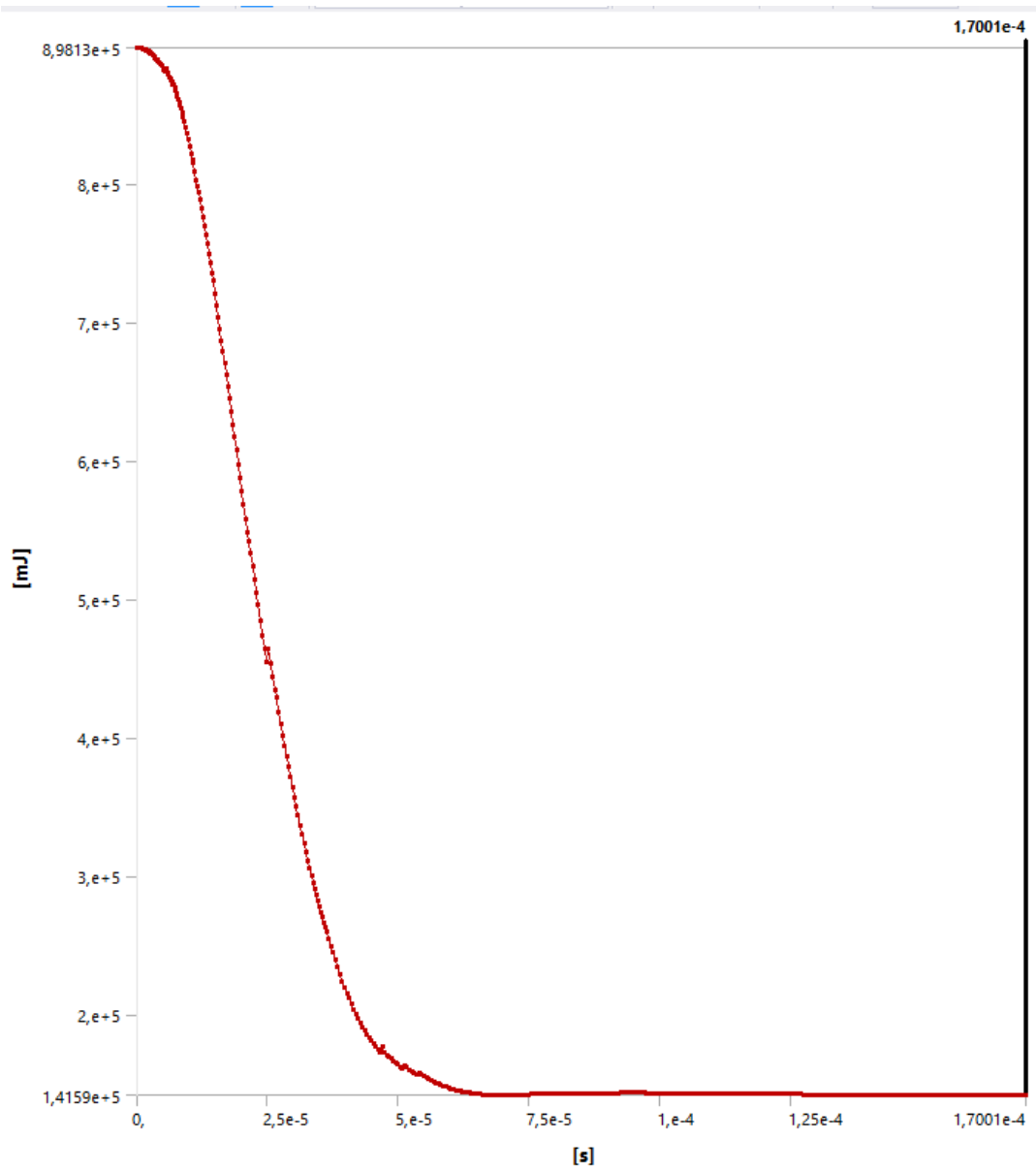
19. Šovinių kalibras, dydis milimetrais [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 04 24]. Prieiga per: <https://www.de2.lt/>
20. BECKER, Marvin. Numerical Ricochet Model of a 7.62 mm Projectile Penetrating an Armor Steel Plate. 15th International LS-DYNA® Users Conference [interaktyvus]. Štutgartas: 2018 [žiūrėta 2020 05 01]. Žiūrėta per: <https://www.dynalook.com/>
21. Armoured Vehicles: HMMWV [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 05 01]. Prieiga per: <http://www.army-guide.com/>
22. Tatrapan 6x6 [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 05 01]. Prieiga per: <https://www.msm.sk/>
23. Sausumos transporto priemonės [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 05 01]. Prieiga per: <http://kariuomene.kam.lt/>
24. Ausrüstung und technik [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 05 01]. Prieiga per: <https://www.bundeswehr.de/>
25. SCHEFFLER, D.R. ir L.S. Magness. Target strength effects on the predicted threshold velocity for hemi- and ogival-nose penetrators perforating finite aluminum targets [interaktyvus]. U.S.A.: U.S. Armijos tyrimų laboratorija, 1998 [žiūrėta 2020 05 02]. ISSN 1743-3509. Prieiga per: <https://www.witpress.com/>
26. CARBAJAL, Leopoldo, Jovan Jovicic ir Helga Kuhlmann. Assault Rifle Bullet-Experimental Characterization and Computer (FE) Modeling [interaktyvus]. Wilmingtonas: DuPont kompanija, 2011 [žiūrėta 2020 05 02]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/>
27. VILKAUSKAS, Andrius. Mažo kalibro kulų balistinių procesų modeliavimas ir tyrimas. Daktaro disertacijos santrauka [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2005 [žiūrėta 2020 05 03]. Prieiga per: <https://epubl.ktu.edu/>

Priedai

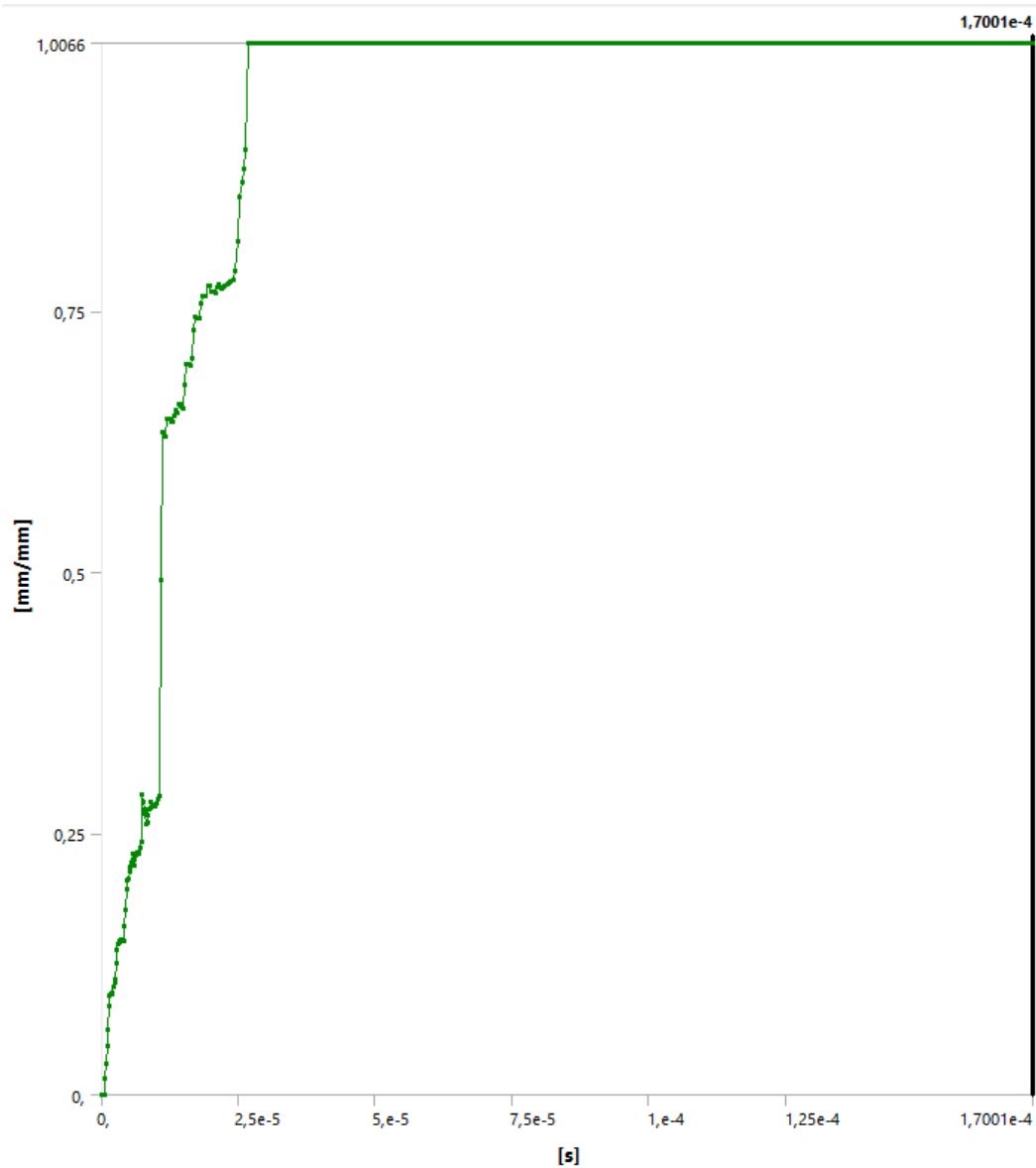
1 Priedas. Pirmo tiriamo objekto grafiniai rezultatai



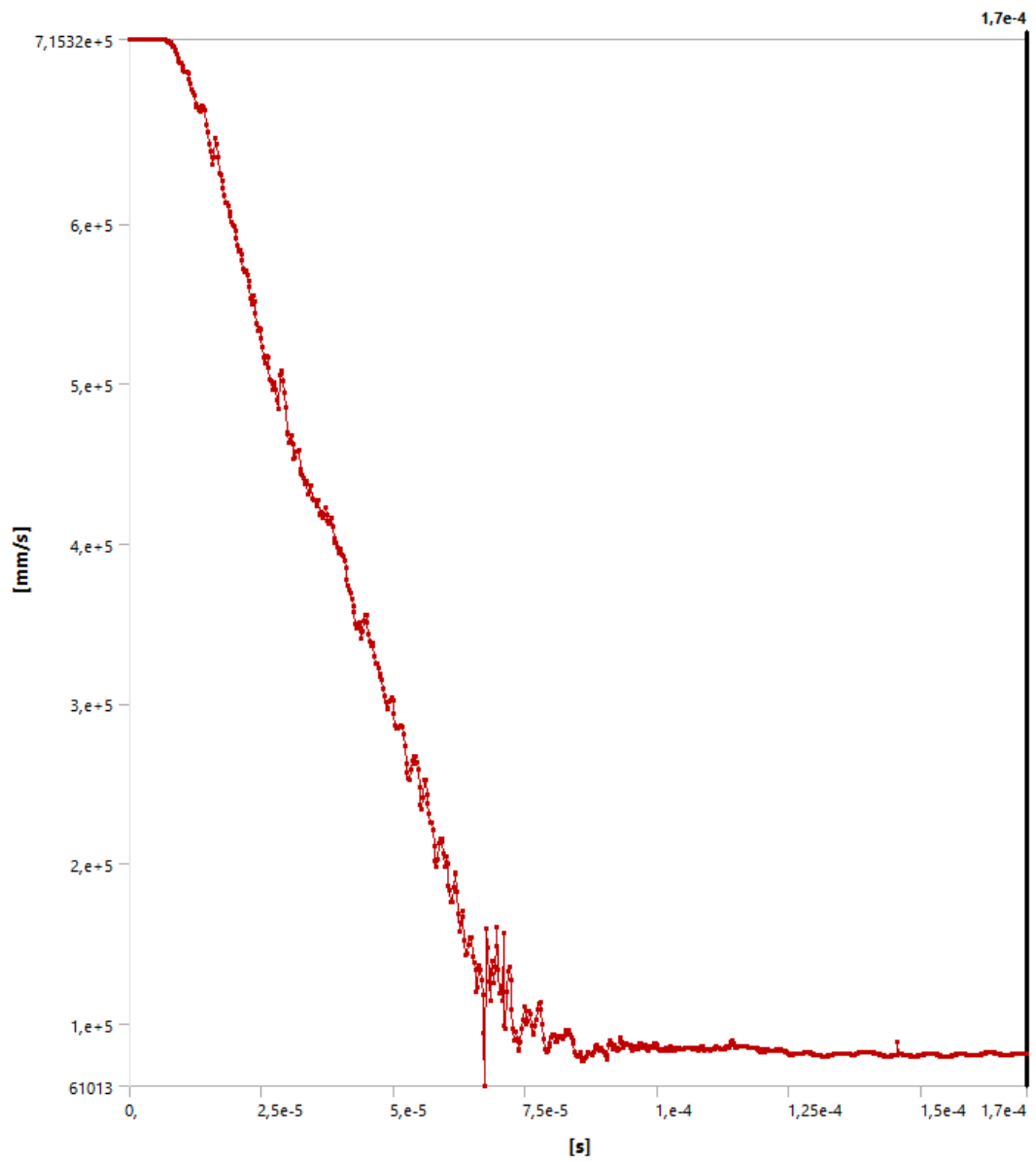
43 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°



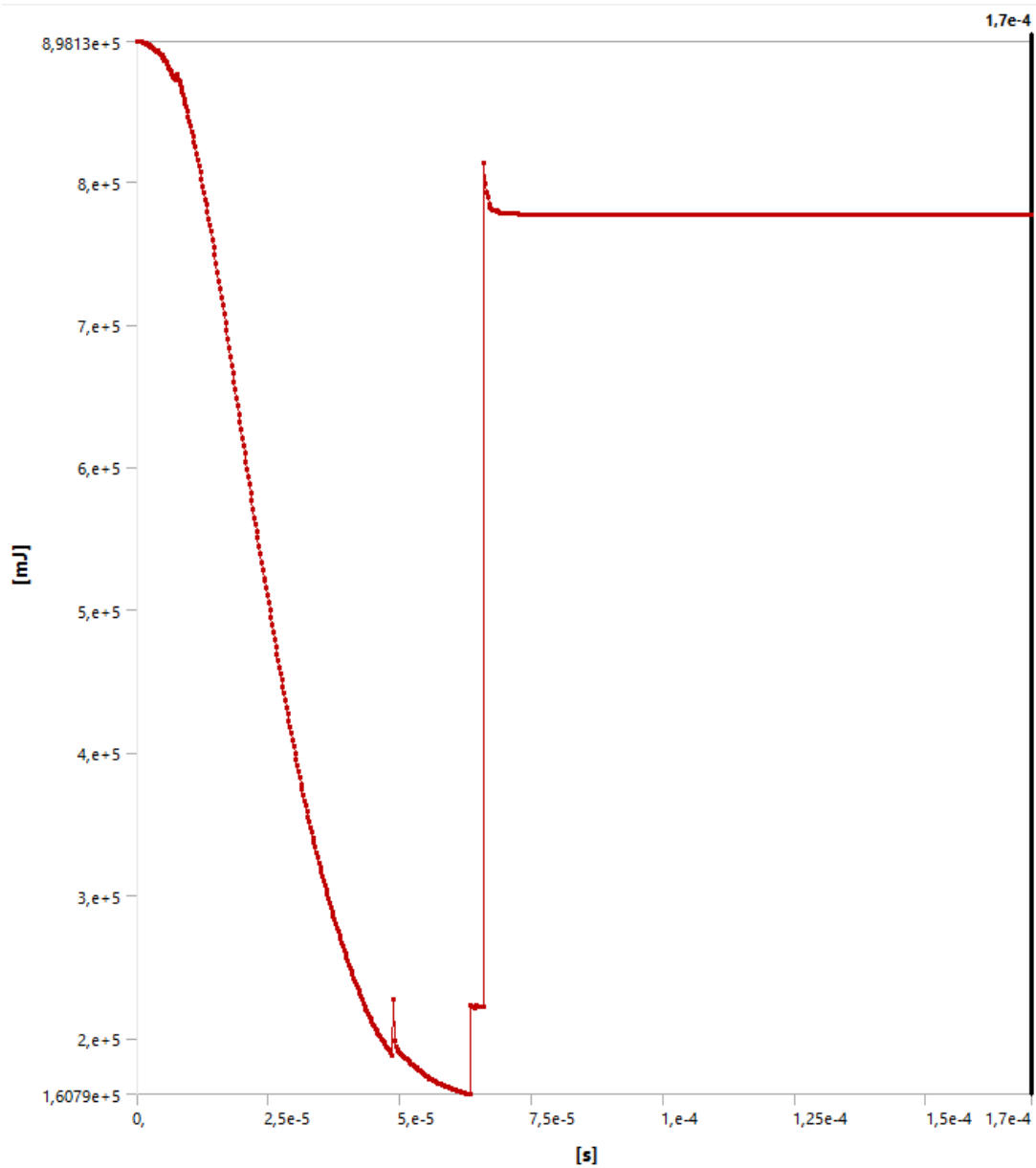
44 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°



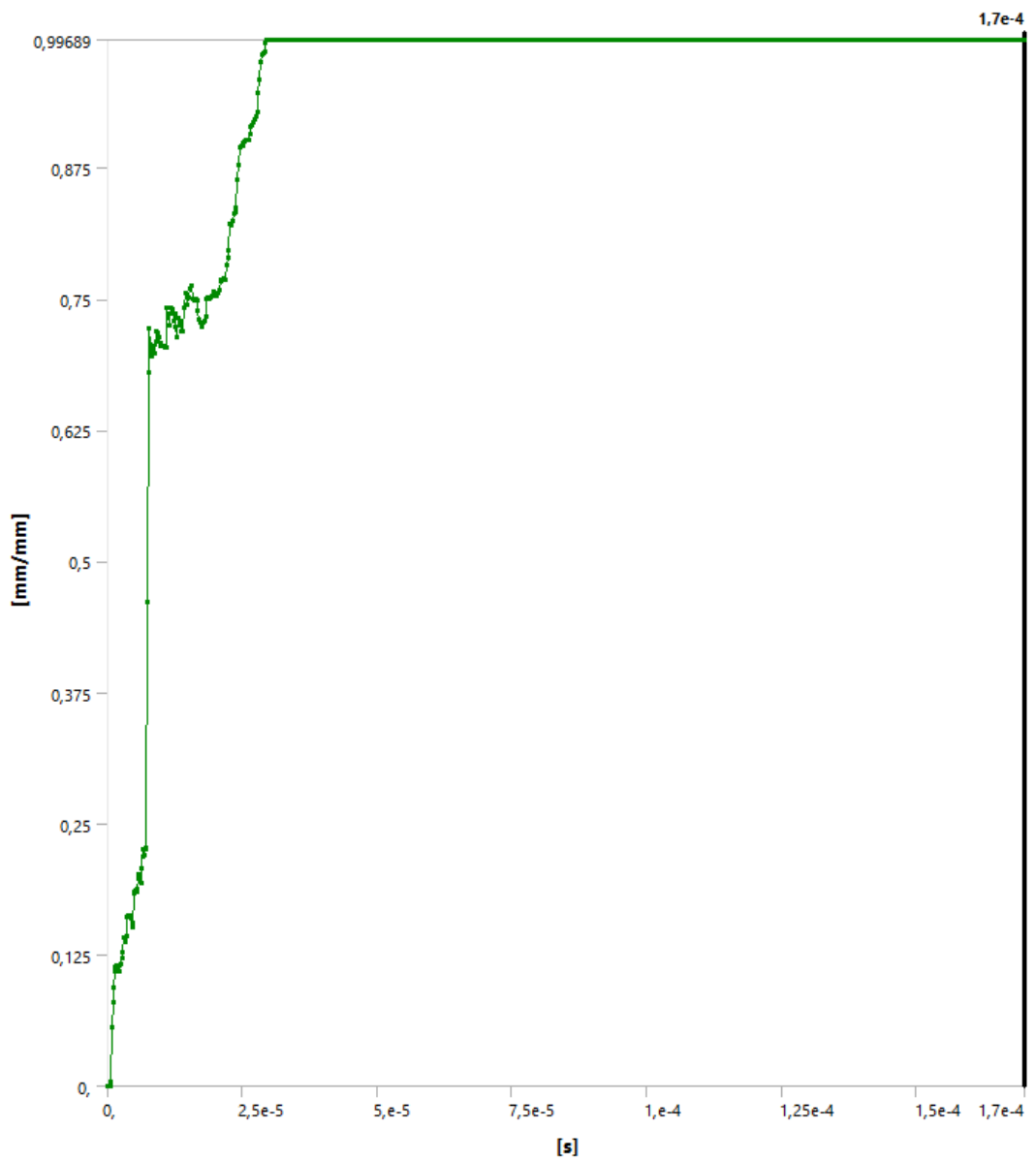
45 pav. Taikinio platinės dedormacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 20°



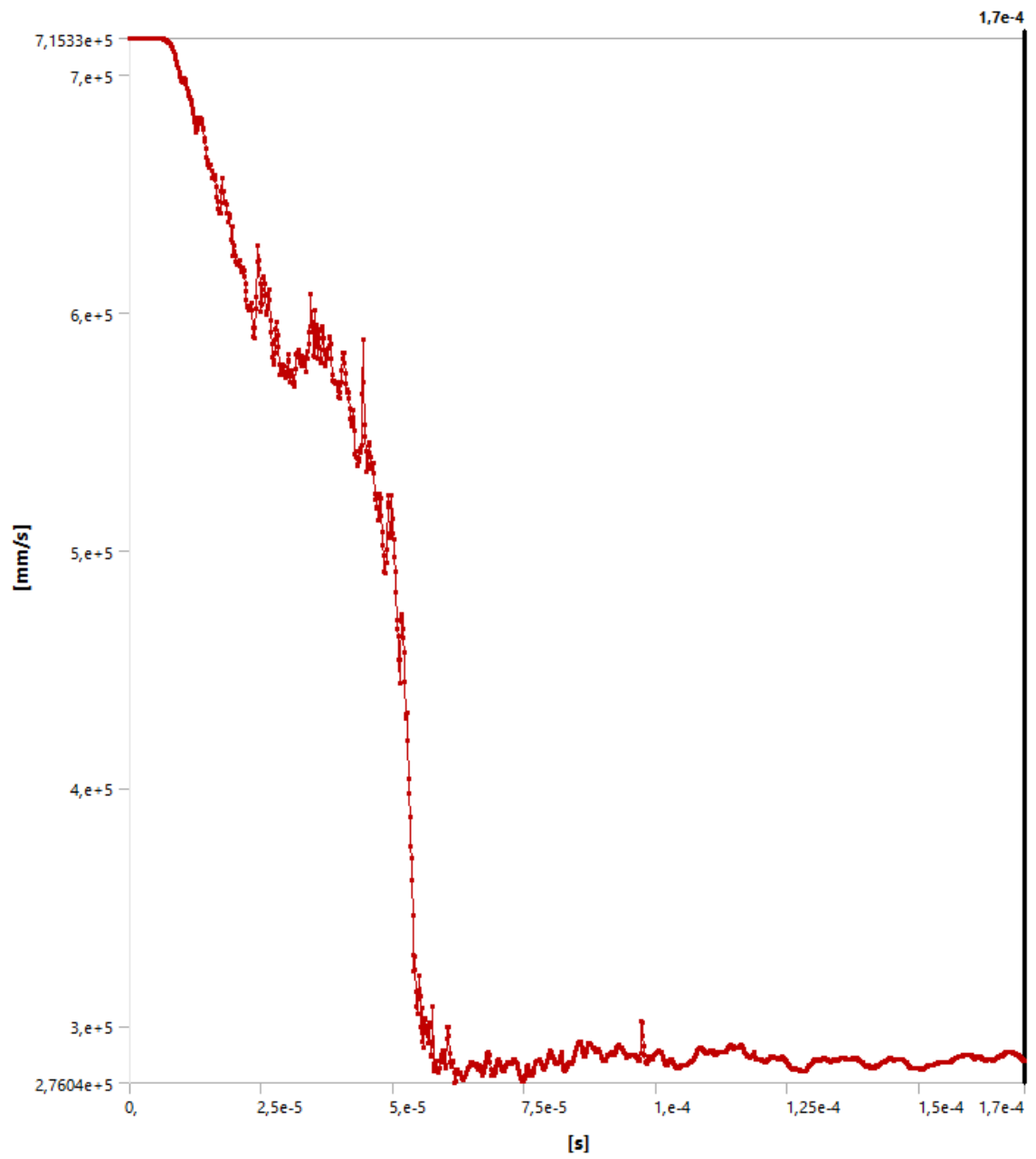
46 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



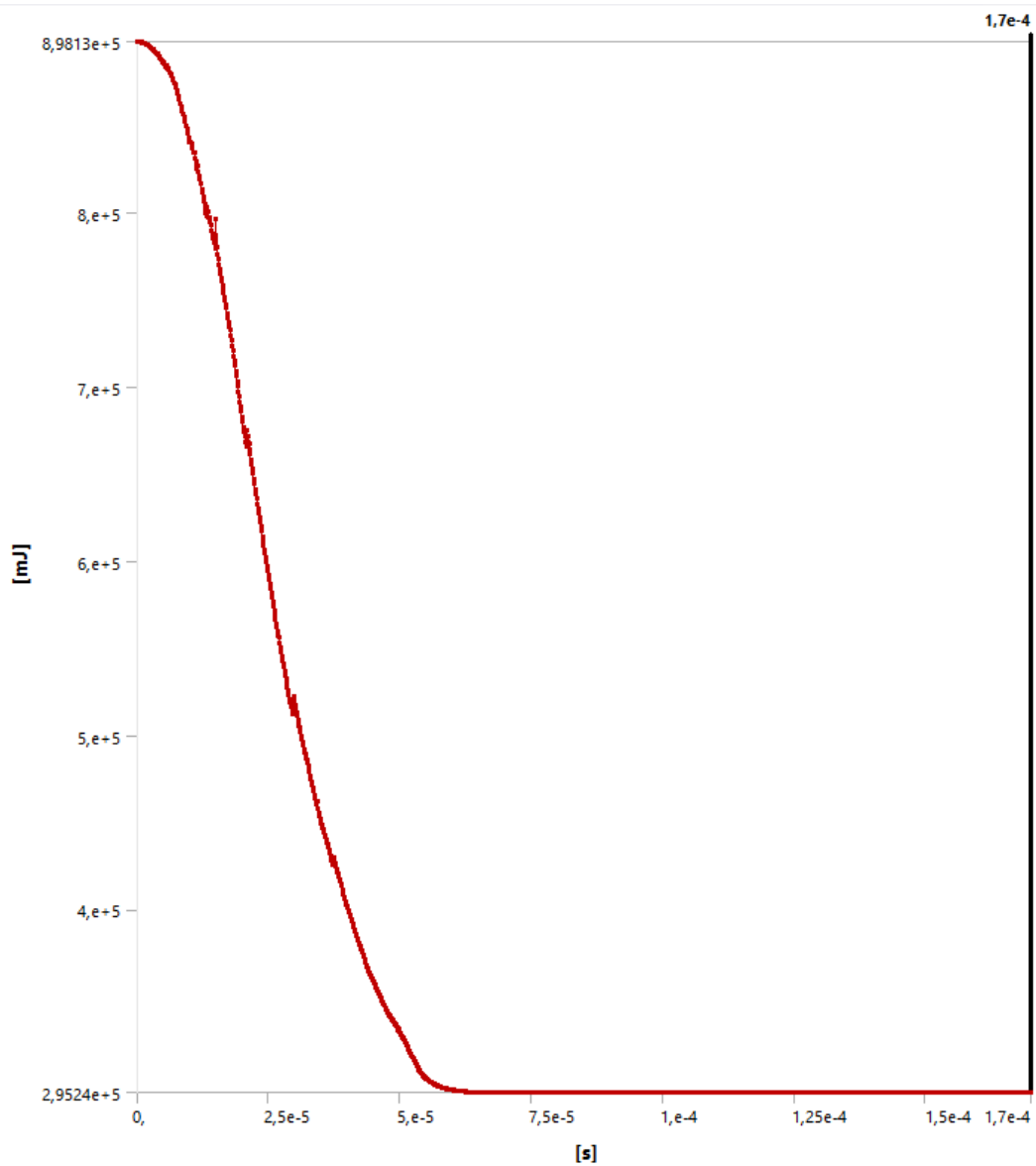
47 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



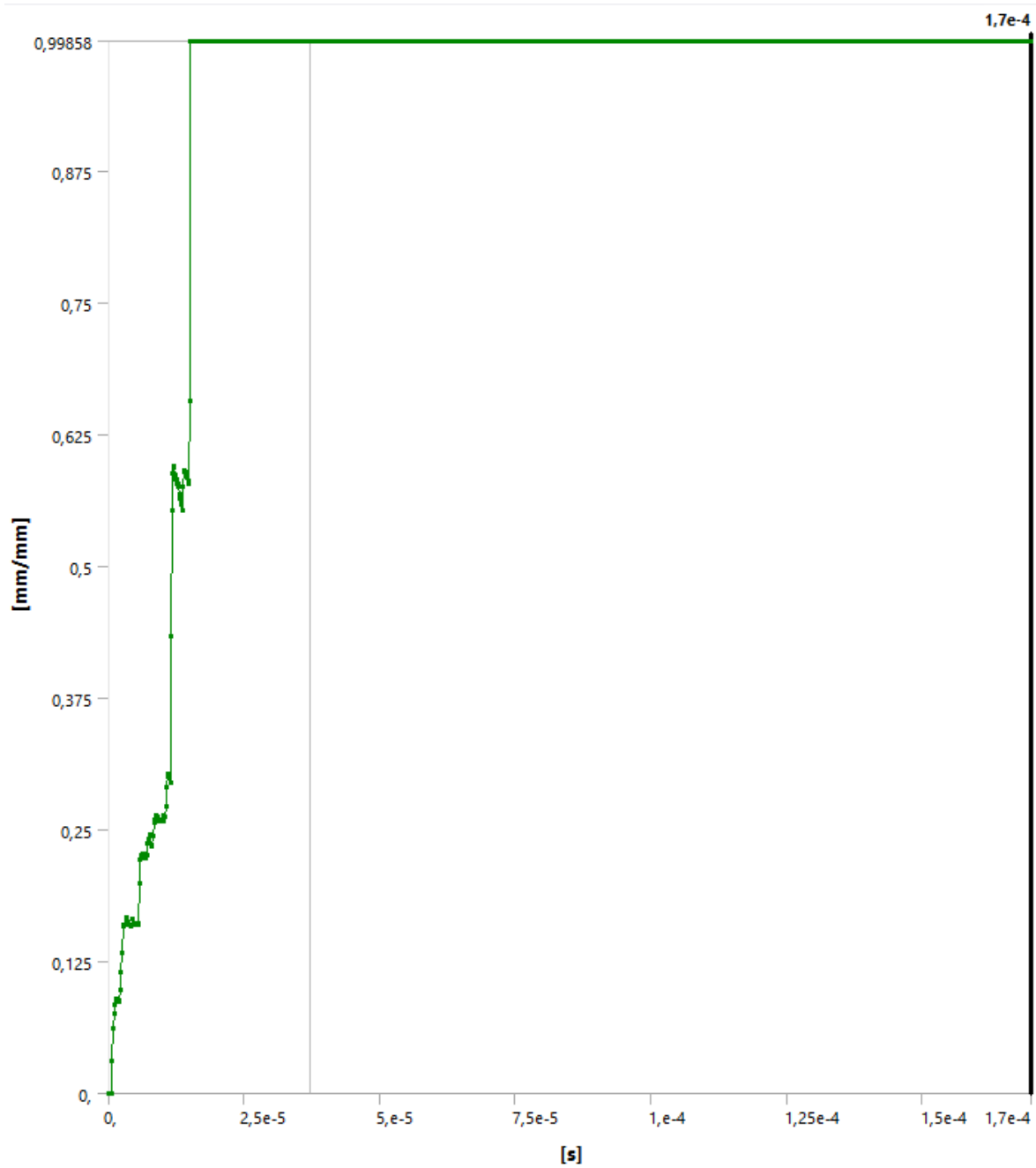
48 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



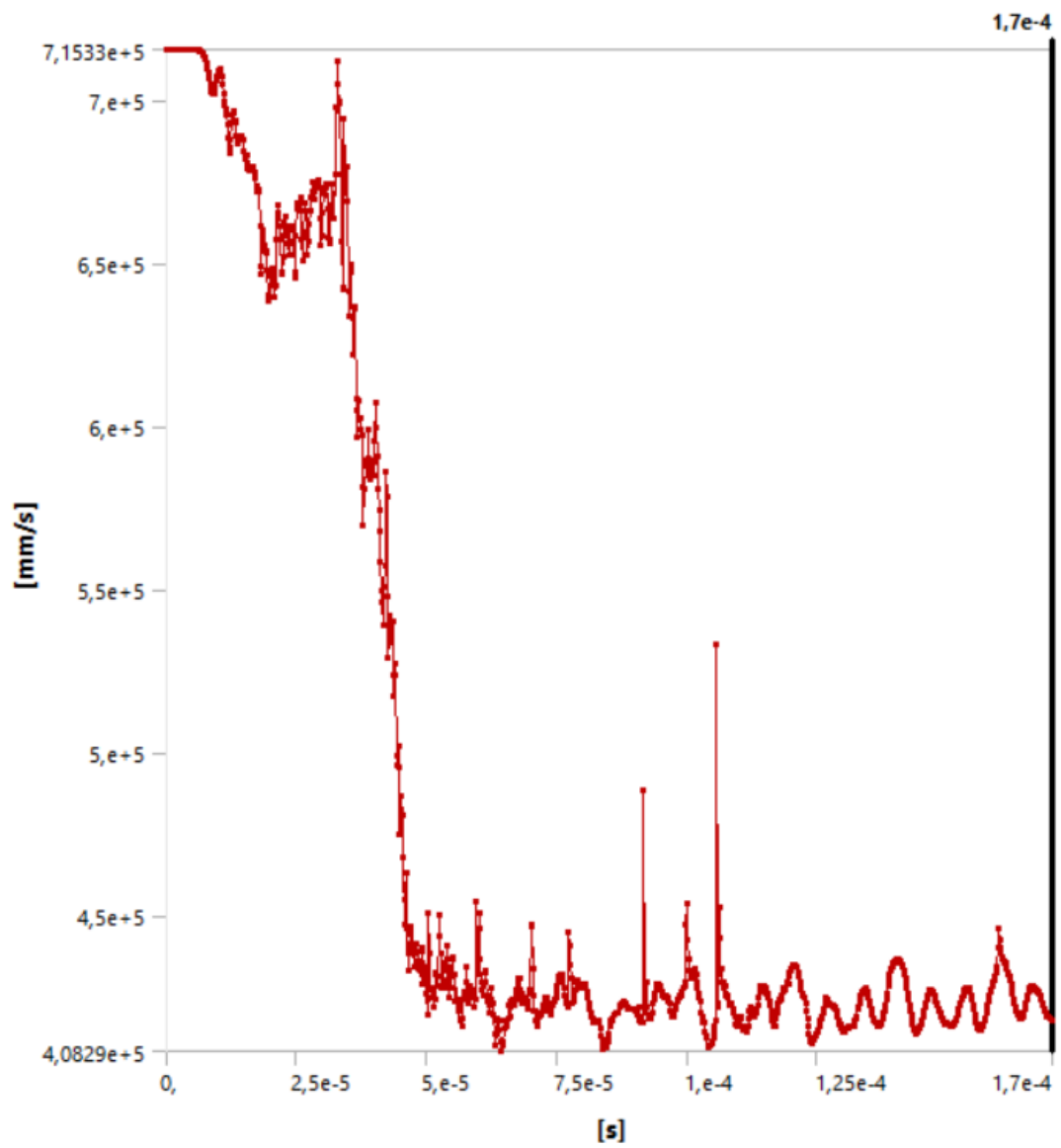
49 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°



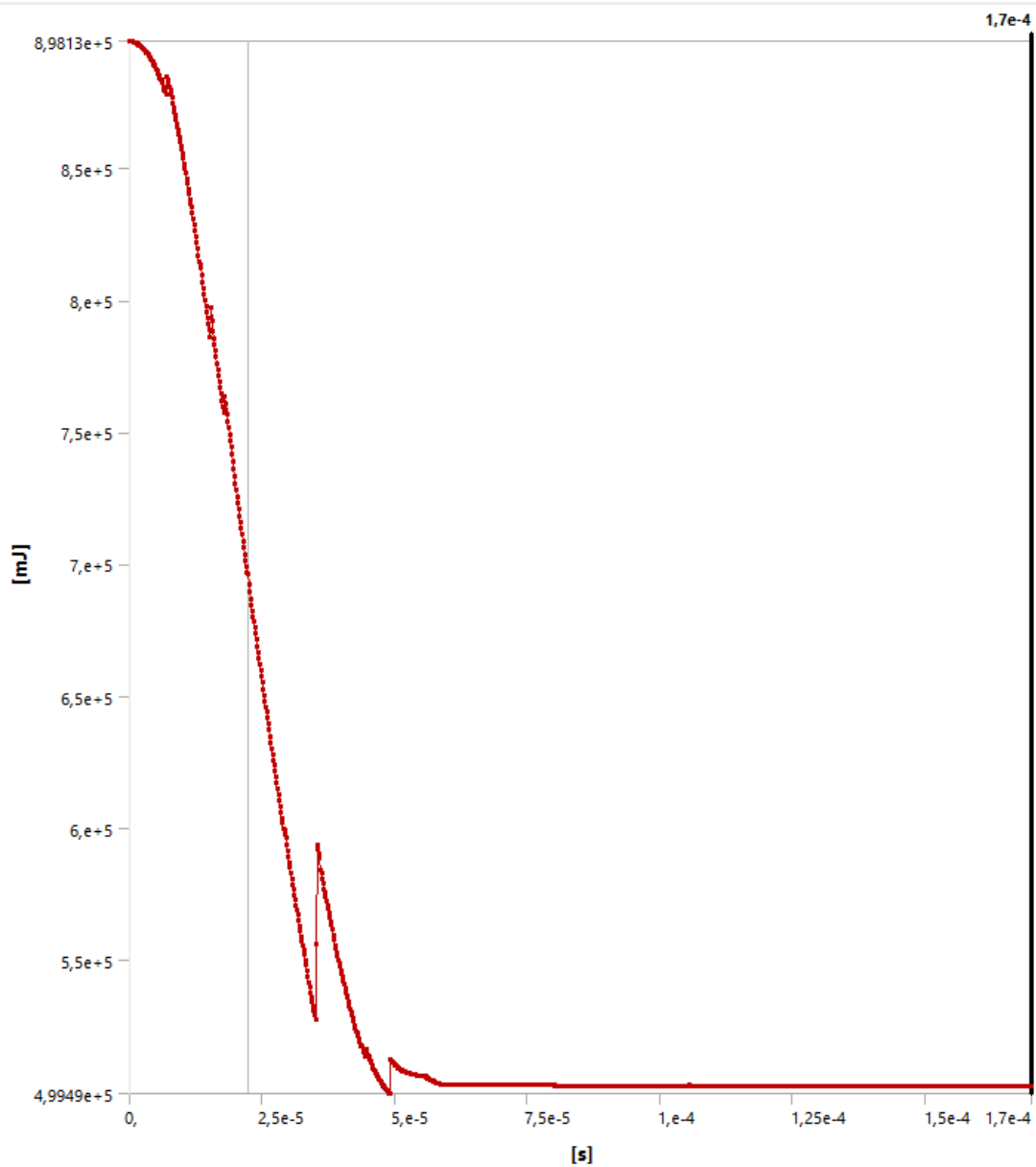
50 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°



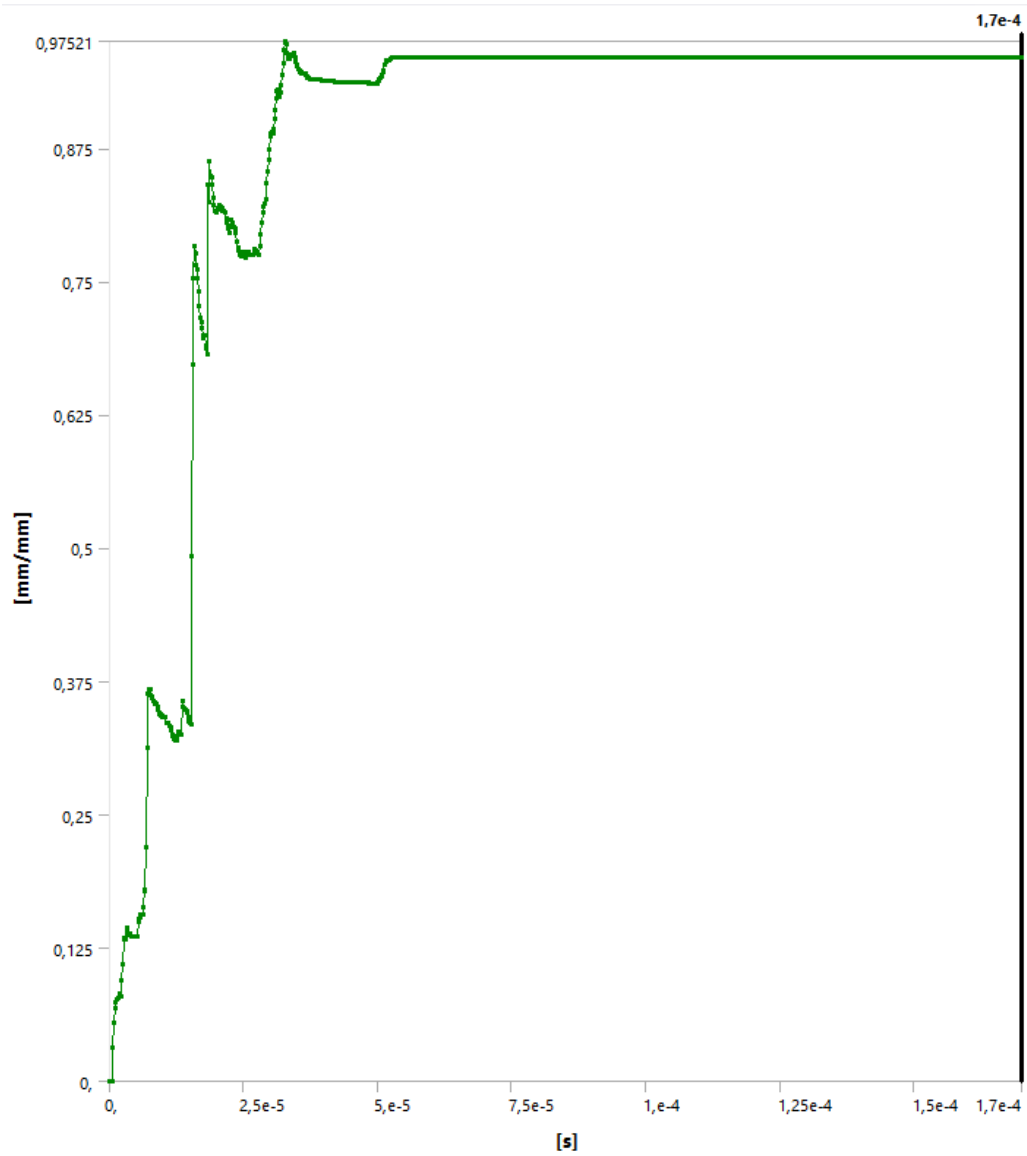
51 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°



52 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°

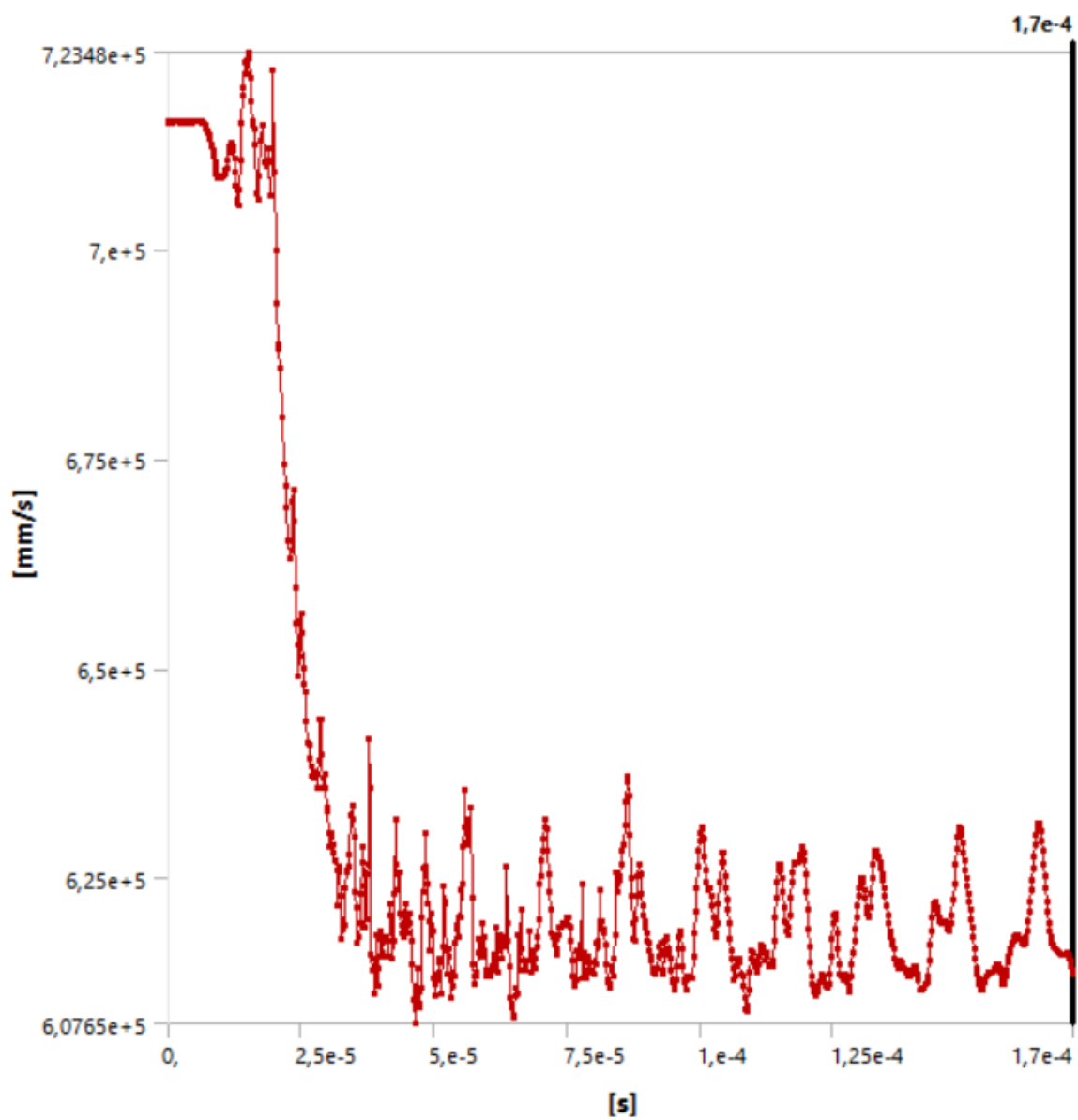


53 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°

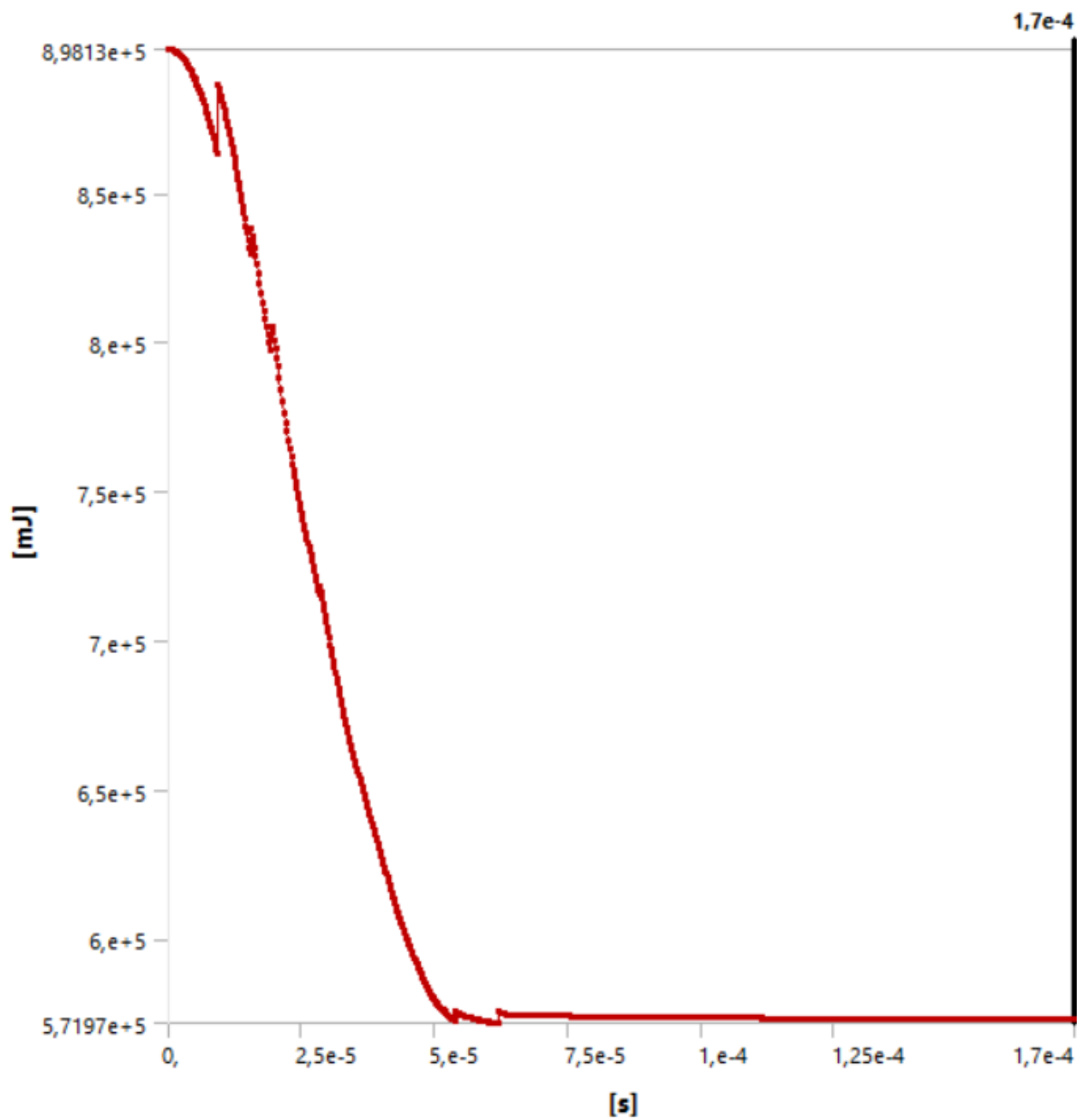


54 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°

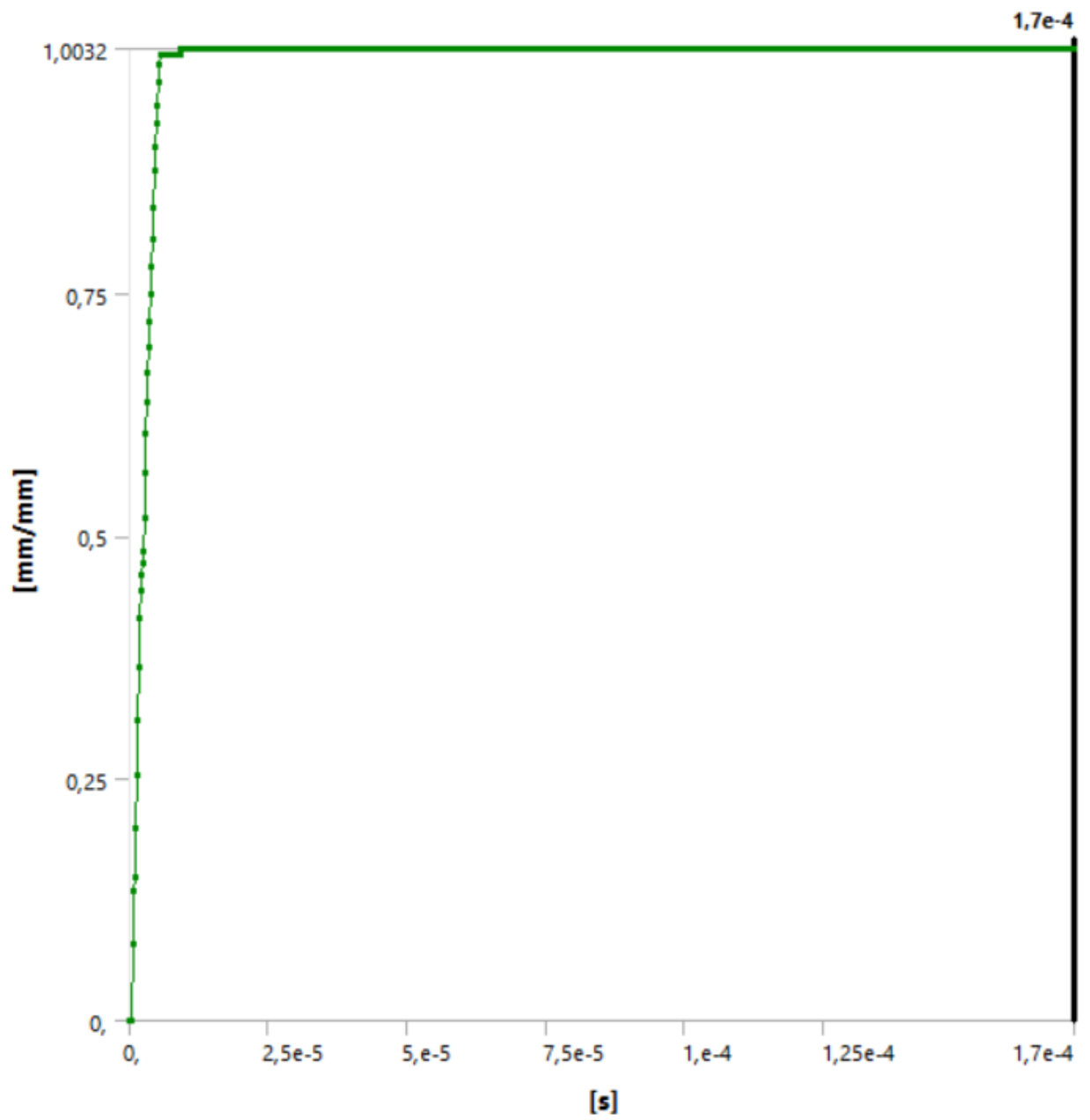
2 Priedas. Antro tiriamo objekto grafiniai rezultatai



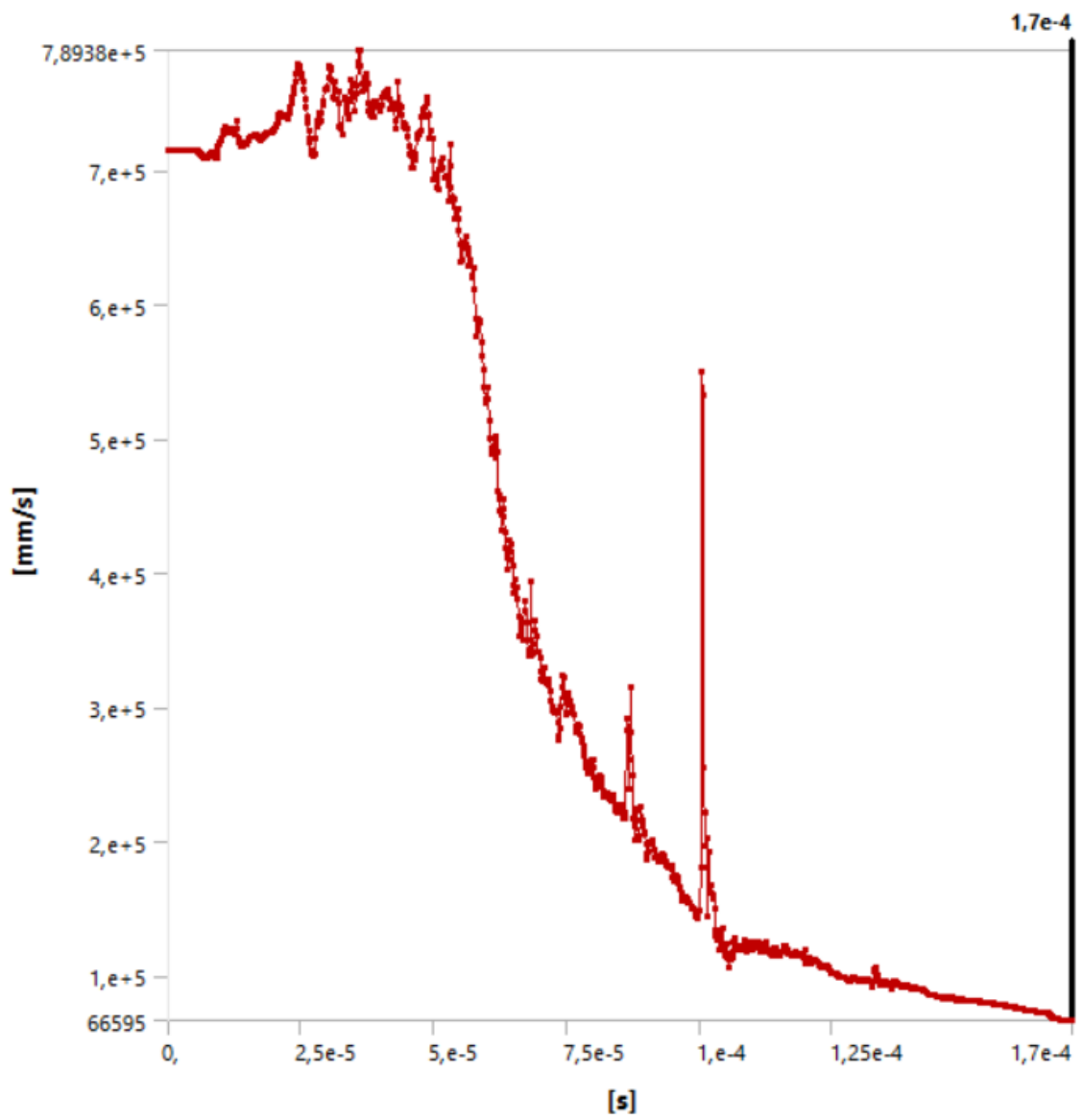
55 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°



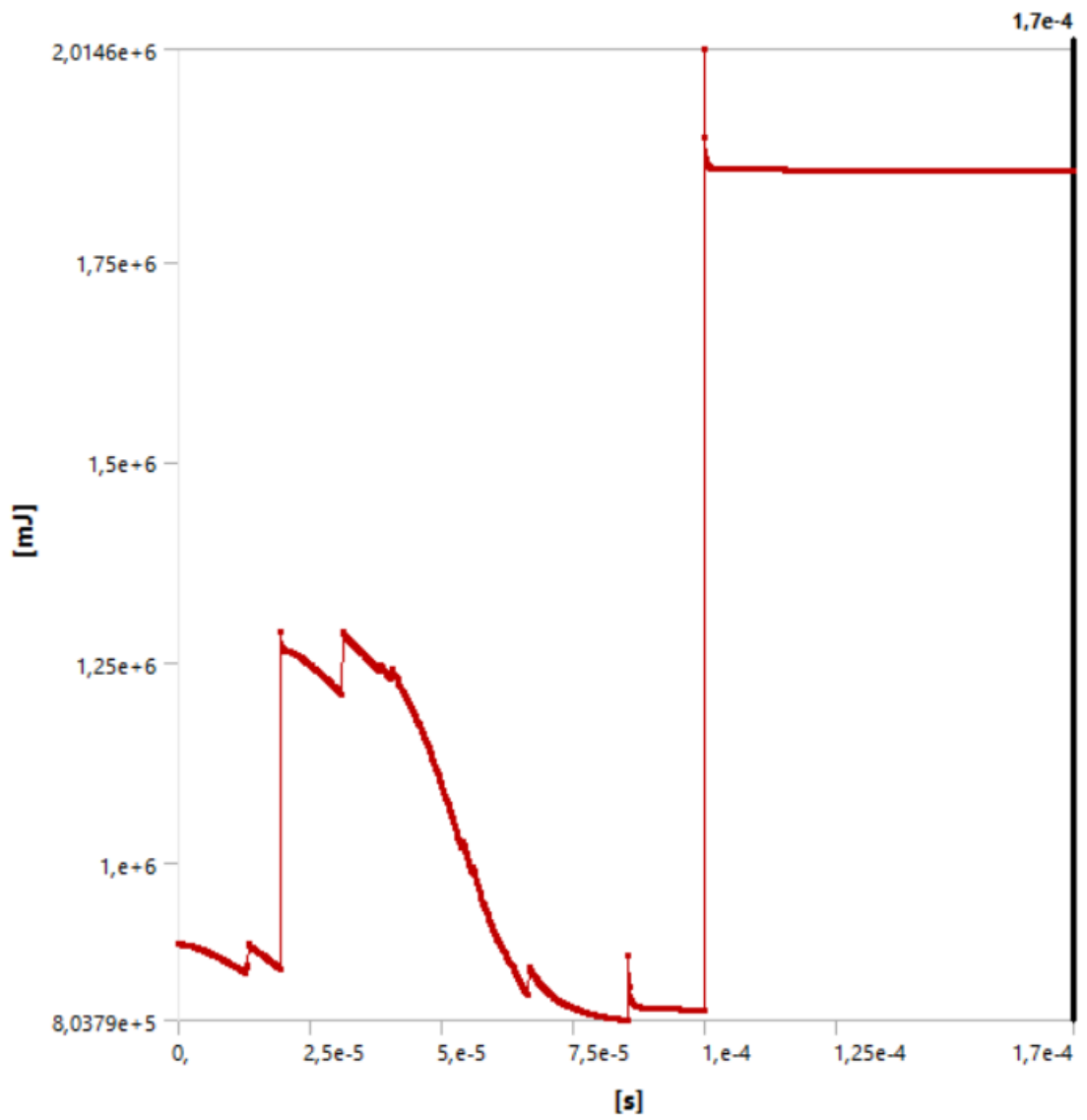
56 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°



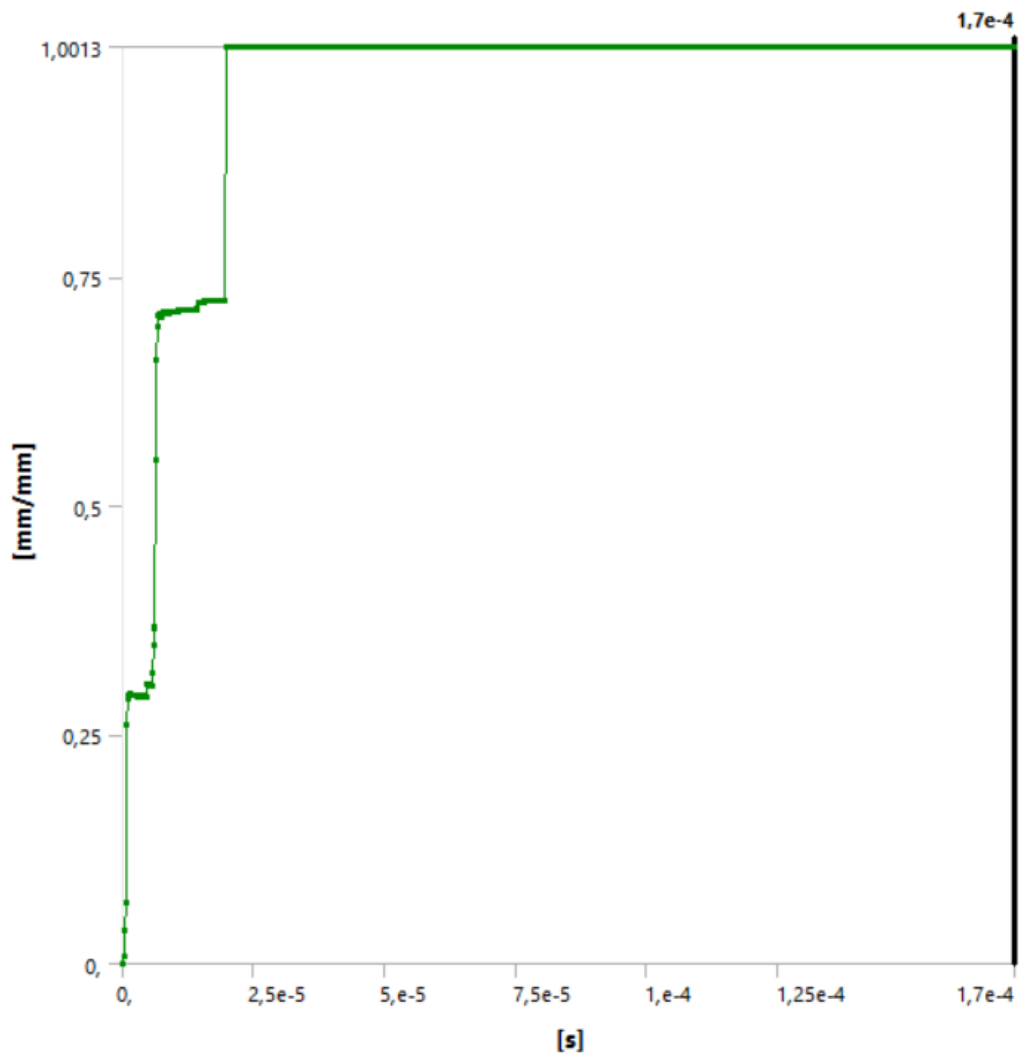
57 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 50°



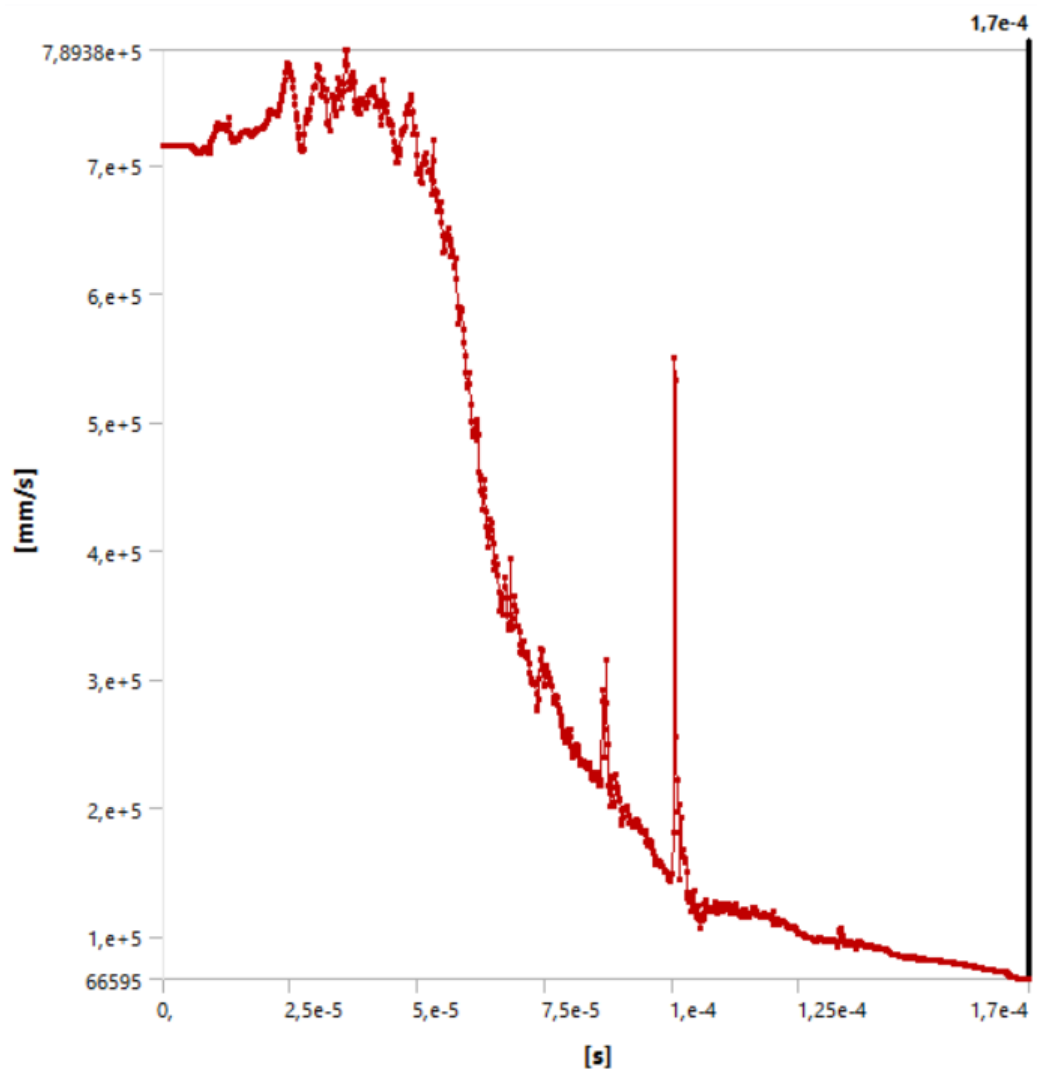
58 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°



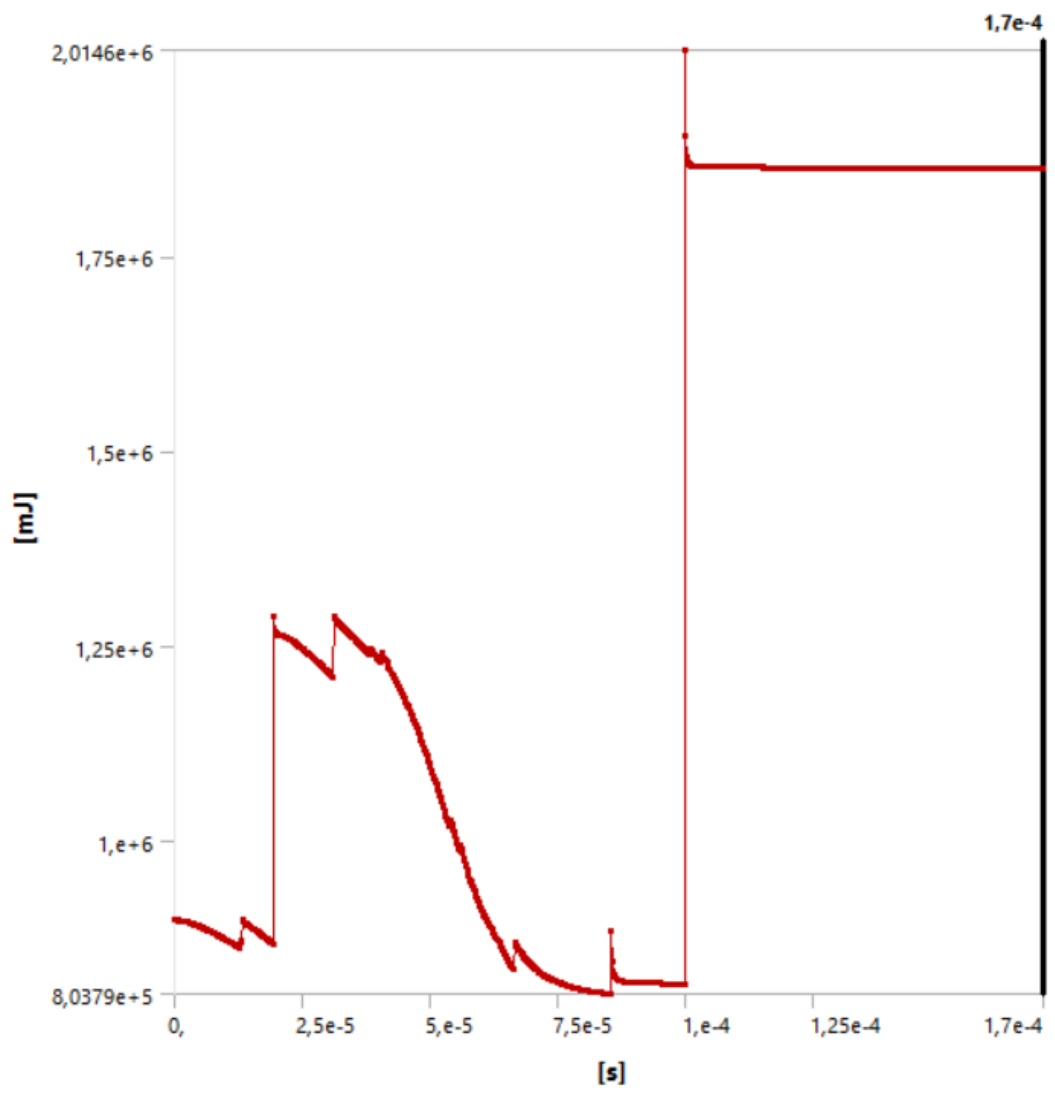
59 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°



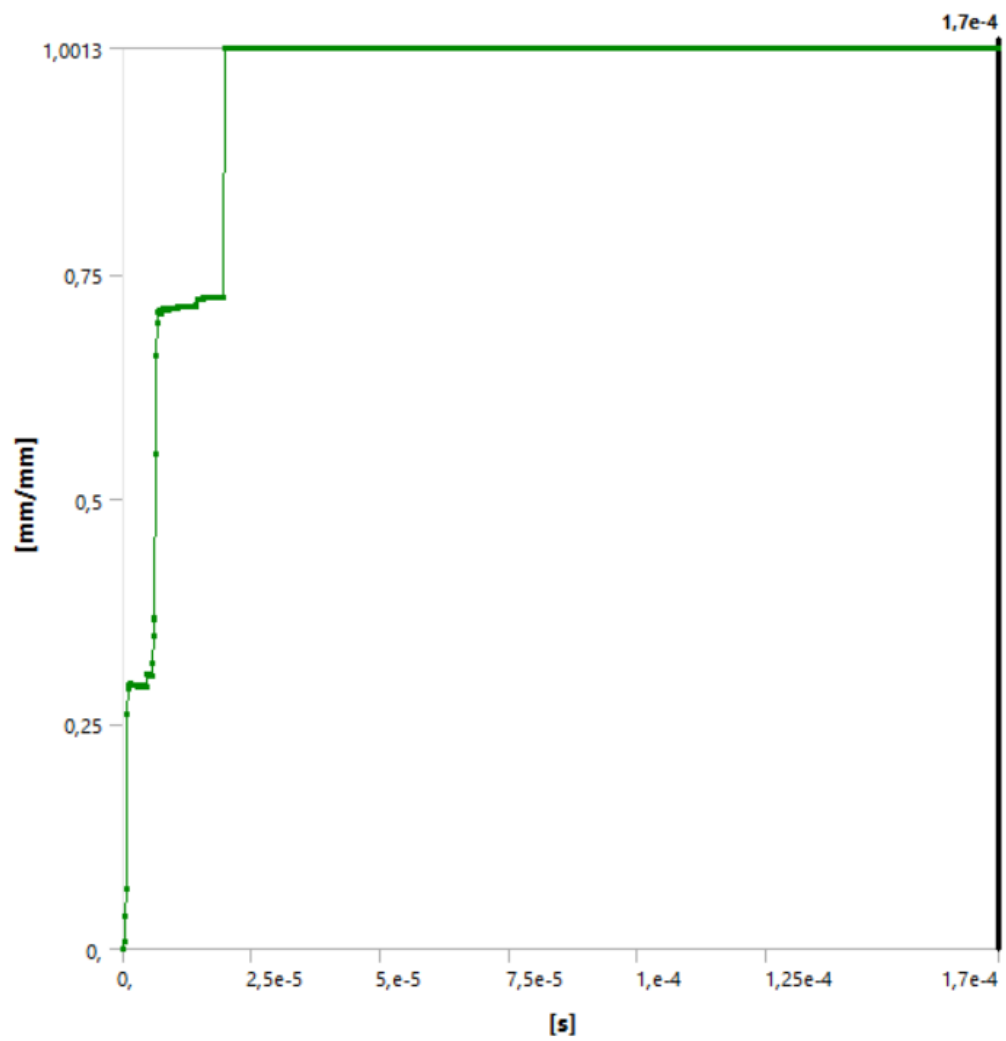
60 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 60°



61 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°

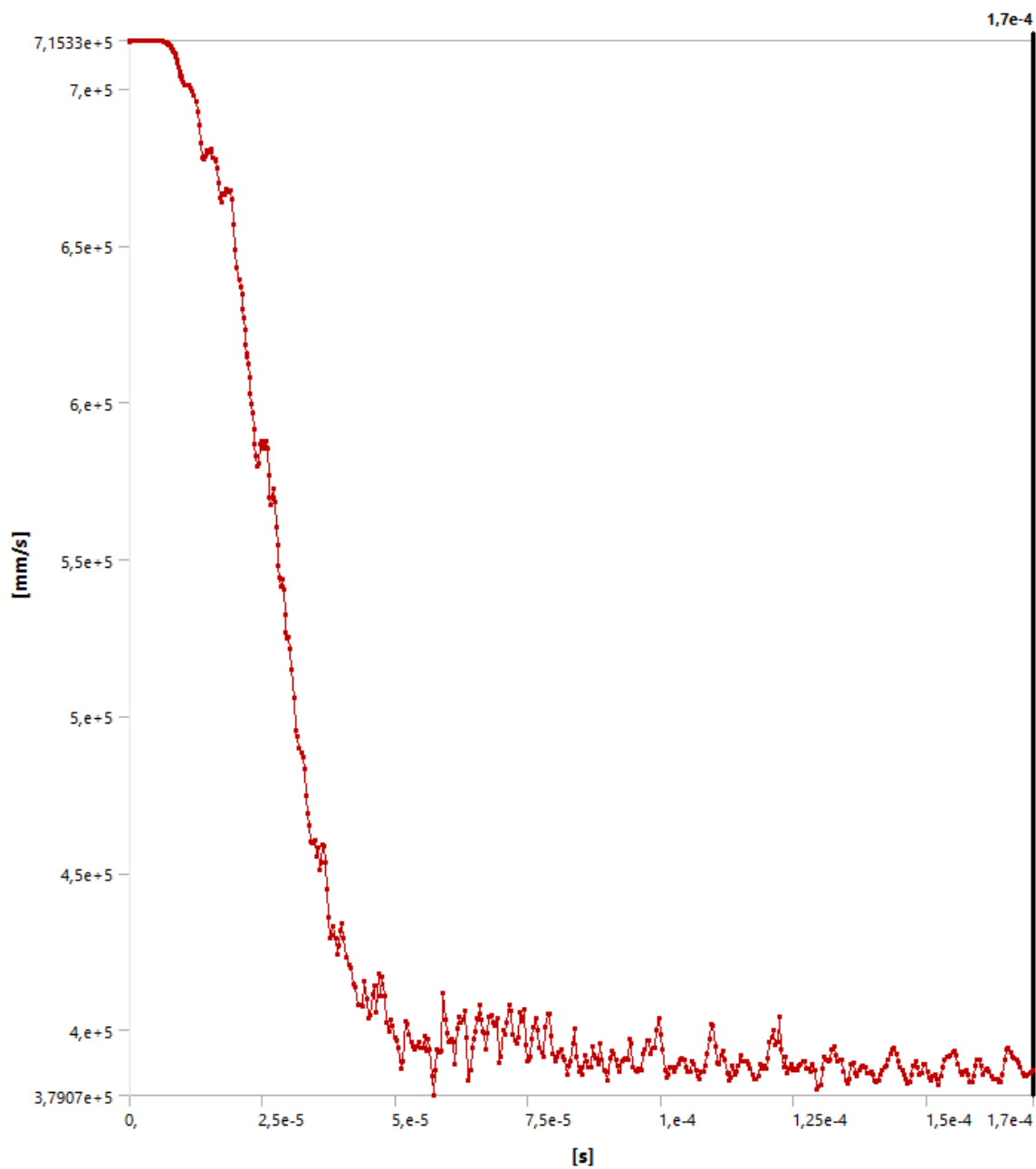


62 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°

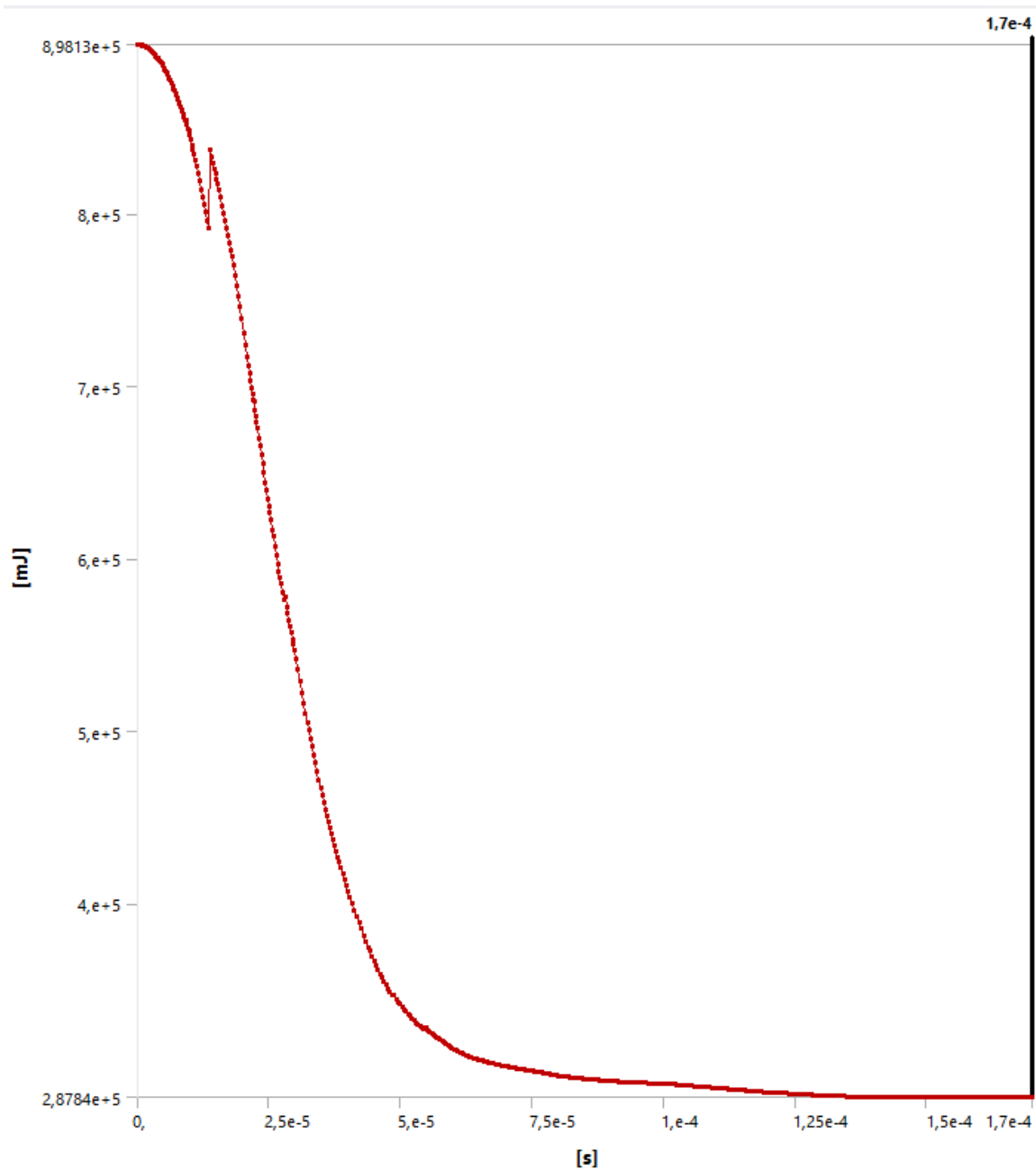


63 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 70°

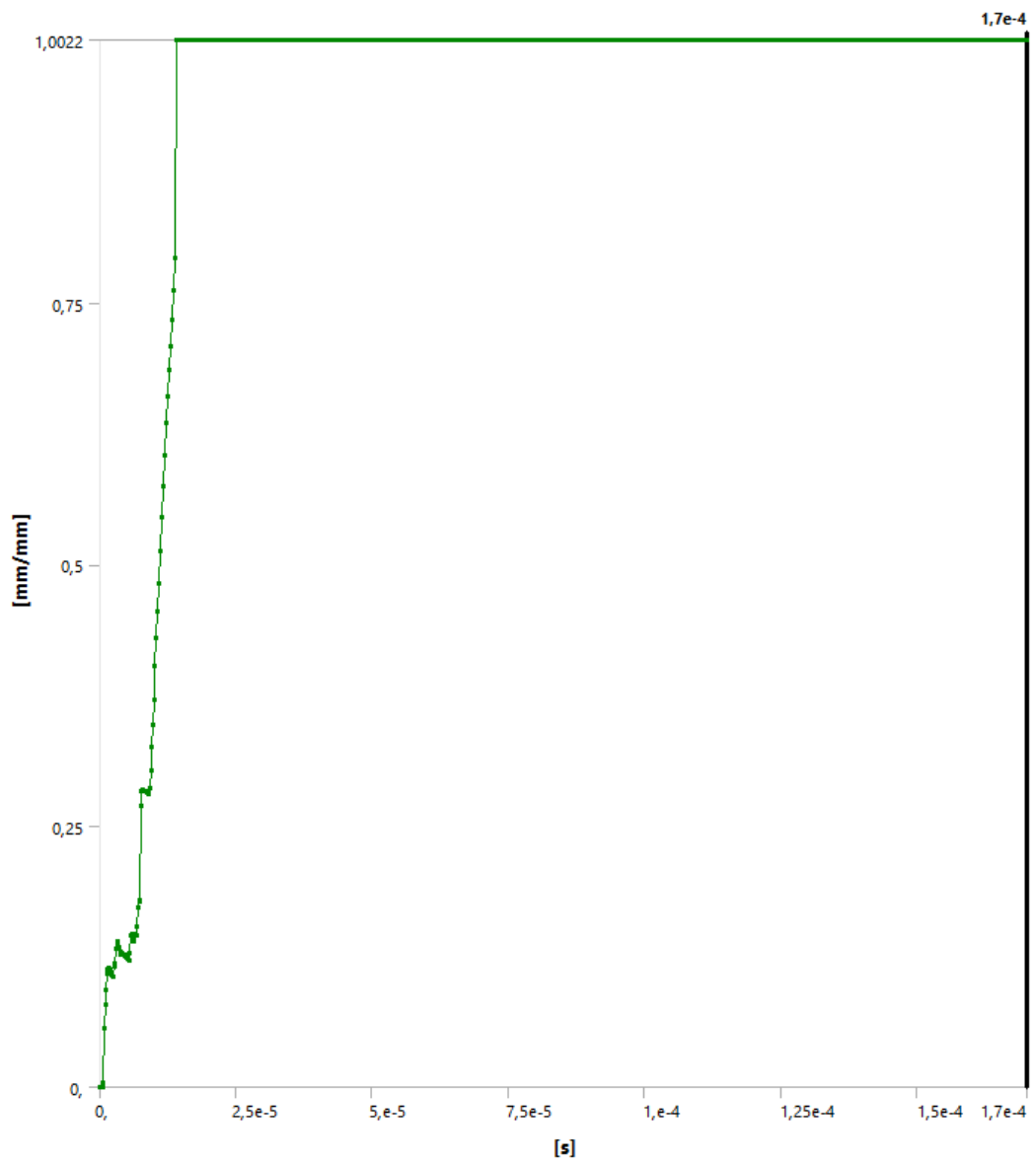
3 Priedas. Trečio tiriamo objekto grafiniai rezultatai



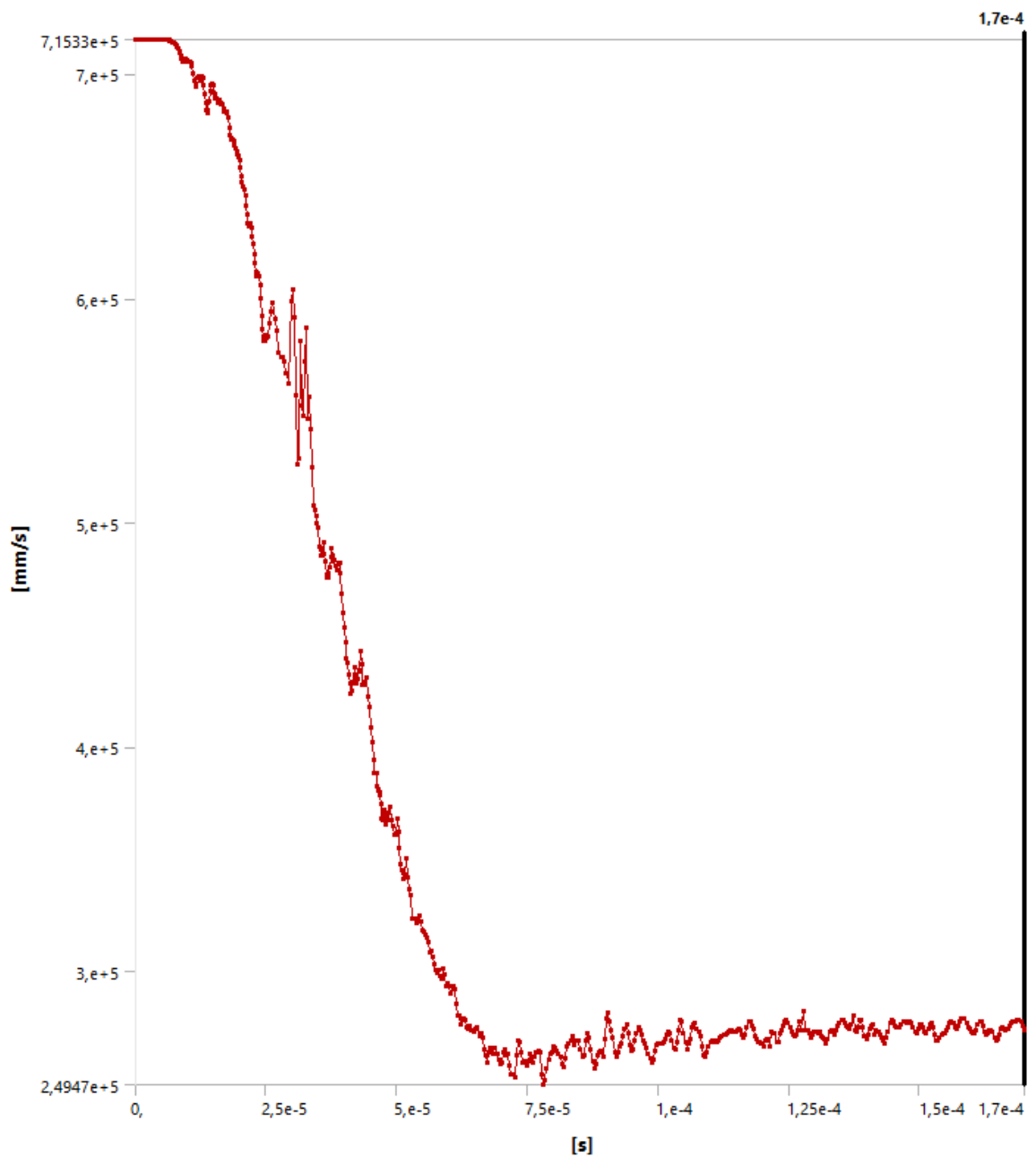
64 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



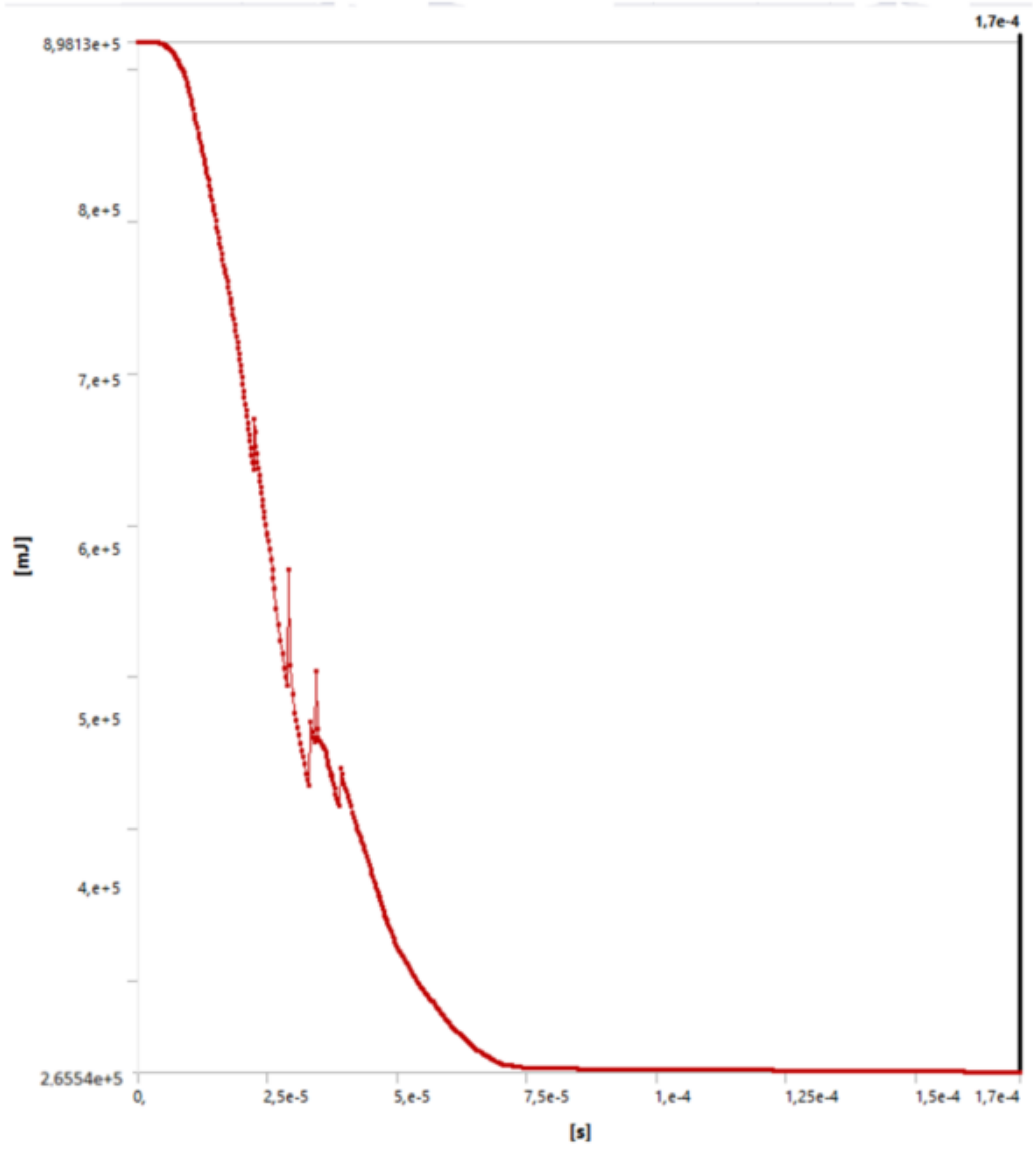
65 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



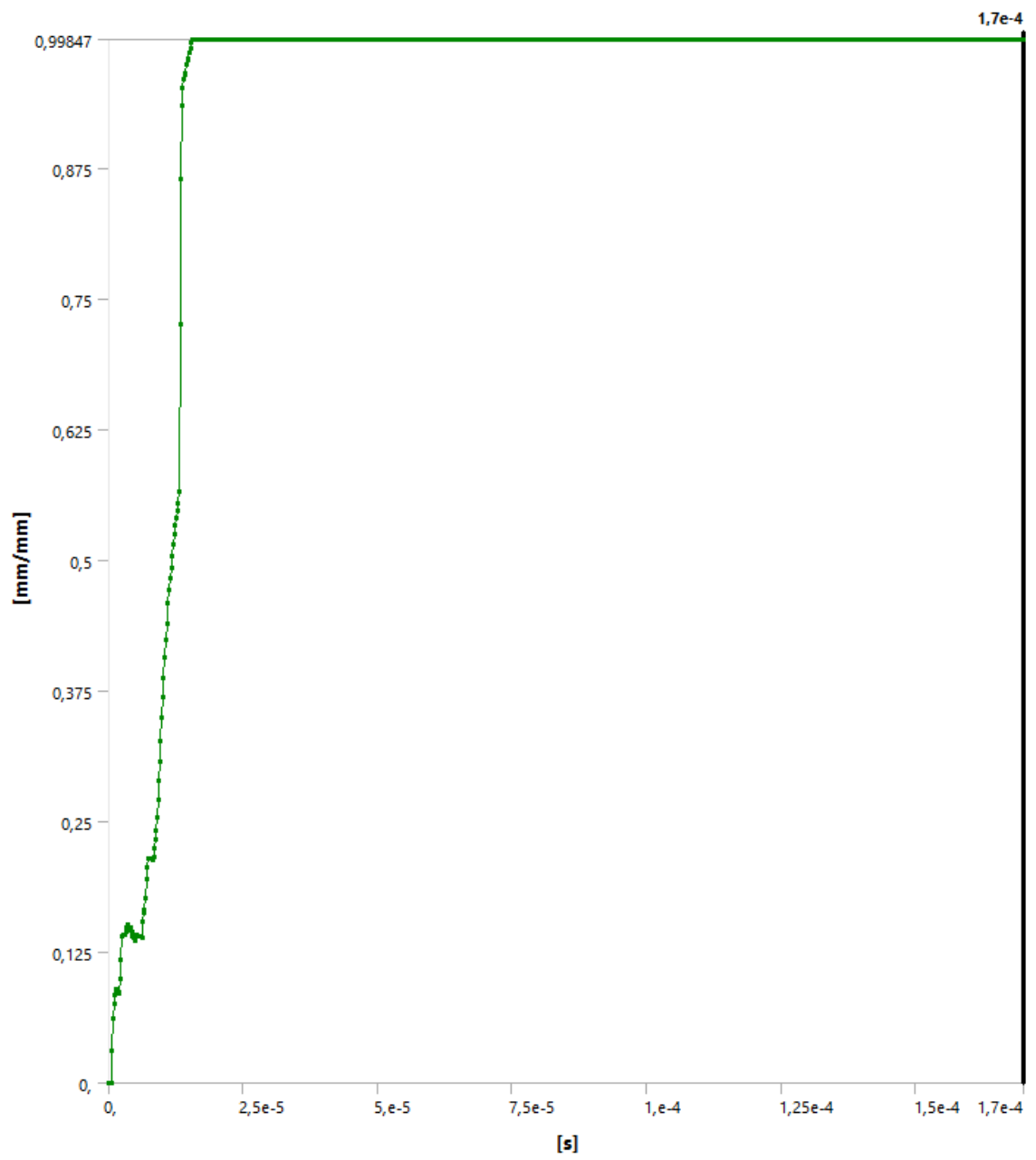
66 pav. Taikinio plastinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 30°



67 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°



68 pav. Sviedinio energijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°



69 pav. Taikinio platinės deformacijos priklausomybė nuo laiko, esant sviedinio atakos kampui 40°