

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

DALIA ČALNERYTĖ

DAUGIASKALIŲ SKAITINIŲ MODELIŲ
SUKŪRIMAS LANKSČIŲ VIENKRYPČIŲ
KOMPOZITŲ DINAMIKOS ANALIZEI

Daktaro disertacija
Fiziniai mokslai, Informatika (09P)

2017, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2017 metais Kauno technologijos universiteto Informatikos fakultete Taikomosios informatikos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Rimantas BARAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, informatika, 09P).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Rozita Znamenskaitė (leidykla „Technologija“)

© D. Čalnerytė, 2017

ISBN 978-609-02-1337-7

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB)

SANTRUMPOS IR SIMBOLIAI

AH – asimptotinis homogenizavimas (angl. *asymptotic homogenization*)
BE – baigtinis elementas (angl. *finite element*)
ESD – efektyvioji suirimo deformacija
BEM – baigtinių elementų metodas (angl. *finite element method*)
PLA – polilaktinė rūgštis
RE – reprezentatyvusis elementas
RP – reprezentatyvusis posritis
S – paslankumo matrica
D – tamprumo matrica
B – elemento formos funkcijų dalinių išvestinių matrica
K – konstrukcijos standumo matrica
U – poslinkių vektorius
F – konstrukciją veikiančių jėgų vektorius
 χ – charakteringųjų poslinkių vektorius
 σ ir ϵ – įtempių ir deformacijų vektoriai, užrašomi naudojant Voigt'o notaciją
 $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $\omega(x, y, z)$ – poslinkiai X , Y ir Z kryptimis
 δ – nurodomų poslinkių dydis
 $N_k(\xi, \eta)$ – baigtinio elemento k -tojo mazgo formos funkcija
 V_k – k -tojo elemento tūris
 F_e – deformacijų gradiento tenzorius
 ϵ^G – Green'o deformacijų tenzorius
 E_A – Jungo modulis A kryptimi
 ν_{AB} – Puasono koeficientas AB plokštumoje
 G_{AB} – šlyties AB plokštumoje modulis
 XT – vienkrypčio kompozito stiprumas gijų kryptimi
 YT – vienkrypčio kompozito stiprumas gijoms statmena kryptimi
 SC – vienkrypčio kompozito šlyties stiprumas
 ϵ_{XT} – deformacija gijų kryptimi, kurioje pasiekama XT vertė
 ϵ_{YT} – deformacija gijoms statmena kryptimi, kurioje pasiekama YT vertė
 γ_{SC} – šlyties deformacija, kurioje pasiekama SC vertė
 ρ_i – i -tosios medžiagos tankis
 α_f, α_m – gijų ir matricos medžiagų dalys kompozicinėje medžiagoje
 R – tenzorių skirtumo įvertis (normuota vidutinė kvadratinė paklaida)
 Λ – krypties kosinusų matrica
T – transformacijos matrica
 $\bar{\sigma}$ – tempimo eksperimentų įtempių įvertis
 $\hat{\sigma}$ – lenkimo eksperimentų įtempių įvertis
 b – bandinio plotis
 h – bandinio storis
 L – bandinio ilgis

TURINYS

Įvadas.....	6
Uždavinio formulavimas (tyrimo objektas).....	7
Tyrimo tikslas.....	7
Tyrimo uždaviniai	7
Tyrimų metodika	7
Darbo mokslinis naujumas ir praktinė reikšmė	8
Darbo rezultatų apibavimas.....	8
Disertacijos struktūra.....	8
1. Kompozicinių medžiagų skaitinių tyrimų apžvalga	9
1.1. Kompozicinės medžiagos	9
1.2. Daugiaskaliai modeliai	10
1.3. Kompozito reprezentatyvusis elementas ir kraštinės sąlygos.....	11
1.4. Kompozito tiesinių tamprumo ir suirimo parametrų nustatymas	13
1.5. Smūginio poveikio laminatams, audiniams ir vienkrypčiams kompozitams skaitinių tyrimų apžvalga.....	15
1.6. Trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintos struktūros tyrimų apžvalga.....	16
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir apibendrinimas	17
2. Metodika (modeliavimo principai).....	19
2.1. Daugiaskalis modelis.....	19
2.1.1. Kevalo elementų lygtys	20
2.1.2. Medžiagų modeliai	21
2.2. Tiesinių tamprumo parametrų įverčiai.....	23
2.2.1. Analitiniai įverčiai	23
2.2.2. Asimptotinis homogenizavimas.....	24
2.2.3. Reprezentatyviojo elemento analizė baigtinių elementų metodu	25
2.3. Netiesinių tamprumo parametrų nustatymas	30
2.4. Suirimo kriterijaus nustatymas (efektyviosios suirimo deformacijos (ESD) parinkimas) antros eilės vienkrypčio kompozito modeliui.....	32
2.5. Antrojo skyriaus išvados	38
3. Skaitiniai eksperimentai	39

3.1. Dviskalis modelis	39
3.2. Tiesinių tamprumo parametrų nustatymas	41
3.2.1. Asimptotinis homogenizavimas	41
3.2.2. Reprezentatyviojo elemento analizė baigtinių elementų metodu	43
3.2.3. Tiesinių tamprumo parametrų palyginimas	46
3.2.4. Reprezentatyviojo elemento forma.....	47
3.3. Netiesinių tamprumo parametrų nustatymas	49
3.4. Suirimo kriterijaus nustatymas (efektyviosios suirimo deformacijos (ESD) parinkimas).....	50
3.5. Ašinio poveikio modeliavimas	53
3.6. Dideliu greičiu judančios absoliučiai kietos sferos kontakto su vienkrypčiu kompozitu modeliavimas.....	56
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	64
4. Taikymas (eksperimentiniai tyrimai).....	66
4.1. Mikrostruktūros įtaka trimačio (3D) spausdintuvo gaminio stiprumui	66
4.1.1. Daugiaskalis modelis.....	66
4.1.2. Mikroskalės modelis.....	66
4.1.3. Eksperimentiniai ir skaitiniai bandymai makroskalėje	69
4.2. Ketvirtojo skyriaus išvados	74
5. Bendrosios išvados	75
Literatūra ir šaltiniai	76
Autorės mokslinių publikacijų darbo tema sąrašas	88
6. Priedas A. G-kodo analizė parametro β parinkimui	89
7. Priedas B. bandinių nuotraukos	91

IVADAS

Kompozicinėmis vadinamos medžiagos, sudarytos iš kelių medžiagų, kurių savybės reikšmingai skiriasi tarpusavyje. Natūralioje aplinkoje (gamtoje) daugelis medžiagų yra kompozicinės – medis, kaulai ir pan. Dirbtinės kompozicinės medžiagos plačiai naudojamos dėl galimybės kombinuojant keletą medžiagų ir parenkant tinkamą vidinę struktūrą gauti pageidaujamas visumines medžiagos savybes. Dėl parinkto gero masės ir stiprumo santykio kompozicinės medžiagos taikomos daugelyje sričių – lėktuvų, šalmų, neperšaunamų drabužių, sporto ir medicininių įrenginių gamyboje.

Skaitinių modelių, kuriais išsamiai aprašoma kompozicinių kūnų bei konstrukcijų fizikinė elgsena, mikrolygmenyje (t. y. modelyje smulkiai pavaizduojant jų mikrostruktūrą) panaudoti praktiškai neįmanoma dėl ribotų kompiuterinių išteklių. Kompiuterio ištekliai, reikalingi realių sistemų modeliavimui mikrolygmenyje, yra tiek dideli, kad netgi aprėpiamoje ateityje tokių uždavinių išspręsti greičiausiai nepavyks. Todėl praktiškai taikomi daugiaskaliai modeliai. Juose tiriami objektai pavaizduojami skirtingose skalėse, kiekvienoje jų taikant skalės skiriamąją gebą atitinkančias prielaidas. Gali būti modeliuojama nuo smulkiausios skalės iki stambiausios, arba atvirkščiai [1]. Modeliuojant nuo stambiausios skalės smulkiausios link, smulkesnėje skalėje nagrinėjamas nedidelis posritis. Jam taikomos kraštinės sąlygos pagal stambioje skalėje gaunamus sprendinius. Pavyzdžiui, smulkioje skalėje tiriamų posričio kraštinių poslinkiai gali būti priimami pagal stambioje skalėje gautus atitinkamų taškų poslinkius. Modeliuojant nuo smulkiausios skalės stambiausios link, medžiagos savybės stambioje skalėje nustatomos pagal smulkesnėje skalėje gautų tos medžiagos reprezentatyviųjų posričių (RP) sprendinius. Kūno reprezentatyviuoju posričiu (RP) vadinama mikroskalėje pavaizduota kūno dalis, kurią apytiksliai galime traktuoti kaip jo diferencialinį elementą stambioje skalėje. Dažniausiai tai būna mikrokubo geometrinės formos skaitinis modelis, pagal kurį nustatomas įtempių ir deformacijų vidutinių reikšmių ryšys, kai vidurkiai apskaičiuojami RP tūrio ribose.

Šiame darbe tiriamas daugiaskalis vienkrypčio lankstaus kompozito modelis, kai iš medžiagos struktūrą smulkioje skalėje įvertinančio RP modelio apskaičiuojami medžiagos savybės apibūdinantys parametrai, kurie vėliau taikomi modeliui stambioje skalėje nagrinėti. Tiriama, jog medžiagos vidinės sandaros mikrogeometrija tiek smulki, kad stambioje skalėje medžiagą galima apytiksliai nagrinėti kaip homogeninę.

Tiesinio tamprumo ribose, kai struktūra patiria mažas deformacijas, o įtempius ir deformacijas tiesiškai sieja apibendrintasis Huko dėsnis, medžiagos parametrus galima nustatyti taikant asimptotinį homogenizavimą pagal baigtinių elementų (BE) metodu gautus sprendinius [2] arba taikant mikromechaninę modelio analizę [3]. Esant didelėms deformacijoms bei netiesinėms kompozitą sudarančių medžiagų savybėms, medžiagos elgsena stambioje skalėje gali būti papildomai apibūdinama takumo riba, stiprėjimo moduliui bei stiprumo riba. Šiame darbe siūloma ekvivalentų medžiagos stiprumą nustatyti pagal RP tyrimo rezultatus, laipsniškai sukelti didesnes RP deformacijas. Sprendžiant medžiagos suirimo uždavinius svarbu parinkti tinkamą algoritmą pernelyg deformuotiems baigtiniams elementams panaikinti.

Kriterijus parenkamas taip, kad elementas nebūtų panaikinamas per anksti. Šiame darbe elementų panaikinimui įvedamas kriterijus, kai efektyvioji deformacija pasiekia nustatytą ribą – efektyviąją suirimo deformaciją (ESD). Šį parametą siūloma įvertinti iš įvairiais kampais globaliojoje koordinacių sistemoje pasukto tempiamo medžiagos fragmento modelio. Taip gaunamos galimos deformacijų kombinacijos, kai struktūra veikiama nepagrindinėmis medžiagos koordinacių ašų kryptimis.

Uždavinio formulavimas (tyrimo objektas)

1. Daugiaskaliai modeliai, skirti nagrinėti lankstų vienkryptį kompozitą skirtingos skiriamosios gebos skalėse.
2. Vienkrypčių kompozitų struktūros modeliai, skirti stambioje skalėje taikomų ekvivalenčių medžiagos parametru nustatymui pagal reprezentatyvųjį posritį smulkiroje skalėje vaizduojančius baigtinių elementų modelius.
3. Smūginio poveikio vienkrypčio kompozito plokštelėms, aprašomoms kevalo elementais, tyrimas taikant sukurtus daugiaskalius modelius.

Tyrimo tikslas

Sukurti lanksčių vienkrypčių kompozitų dinamikos analizei skirtus daugiaskalius modelius, kurie leistų nustatyti parametrus, apibūdinančius kompozito elgseną stambioje skalėje pagal kompozito struktūros modelius smulčiausioje skalėje.

Tyrimo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti iškelti tokie uždaviniai.

1. Sudaryti daugiaskalius skaitinius modelius, kai smulčiausioje skalėje nagrinėjama vienkrypčio kompozito struktūra aprašoma dvimačiais ir trimačiais baigtiniais elementais.
2. Apibrėžti tinkamas kraštines sąlygas tiesinių tamprumo, stiprumo ir suirimo parametru nustatymui.
3. Verifikuoti sukurtus daugiaskalius modelius, plokštumoje tiriant stambioje skalėje kevaliniais baigtiniais elementais aprašytą modelį, kuriame panaudoti pagal smulčiausios skalės modelio tiesinės ir netiesinės analizės rezultatus gauti ekvivalenčiosios medžiagos parametrai.
4. Verifikuoti sukurtus daugiaskalius modelius, sprendžiant absoliučiai kietos sferos ir stambioje skalėje pavaizduoto kompozito smūgio sąveiką bei sulyginant rezultatus su rezultatais, gautais naudojant smulkiroje skalėje pateiktą atskaitos modelį.
5. Eksperimentiškai patikrinti, kaip skaičiavimai atitinka tikrovę, sudarant dviejų skalų modelį trimačiu (3D) spausdintuvu pagaminto objekto stiprumo tyrimui, iširti mikrostruktūros įtaką bei sulyginti gautus rezultatus su fizikinių eksperimentų rezultatais.

Tyrimų metodika

Baigtinių elementų metodu iš smulčiausios skalės modelio apskaičiuojami tiesiniai ir netiesiniai tamprumo parametrai, parenkamas baigtinių elementų panaikinimo kriterijus. Statinė ir dinaminė reprezentatyviojo elemento analizė

atliekama taikant sukurtas programas bei baigtinių elementų programą LS-DYNA, rezultatai apdorojami MATLAB programa. Modelių konvergavimas tiriamas keičiant baigtinių elementų skaidymo smulkumą. Modeliai verifikuojami lyginant modelius, kai ta pati konstrukcija pateikiama skirtingos skiriamosios gebos skalėse.

Darbo mokslinis naujumas ir praktinė reikšmė

Svarbiausias darbo mokslinio naujumo elementas yra ekvivalenčių kompozicinės medžiagos parametrų nustatymo metodo išplėtimas, leidžiantis matematiškai nustatyti jos suirimo kriterijus. Iki šiol žinomuose darbuose daugiaskalės analizės būdu būdavo apskaičiuojami tiesiniai tamprumo parametrai, o netiesiniai – dažniausiai parenkami empiriškai, remiantis analogijomis bei moksline intuicija. Praktinę reikšmę sąlygoja kompozitų skaitinių modelių galimybių išplėtimas. Net ir sudėtingų netiesinės sąveikos uždavinių atveju sutaupomi skaičiavimo ištekliai, kadangi praktiškai priimtino tikslumo rezultatai gaunami esant palyginti nedideliu baigtinių elementų skaičiui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 7 moksliniai straipsniai, iš jų 2 straipsniai Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose su citavimo indeksu, 5 straipsniai pristatyti tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 4 pagrindiniai skyriai, išvados, literatūros šaltinių sąrašas, priedai. Disertacijos apimtis – 92 puslapiai. Disertacijos pagrindinėje dalyje yra 39 paveikslai, 15 lentelių ir 125 šaltinių cituojamos literatūros sąrašas.

1. KOMPOZICINIŲ MEDŽIAGŲ SKAITINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

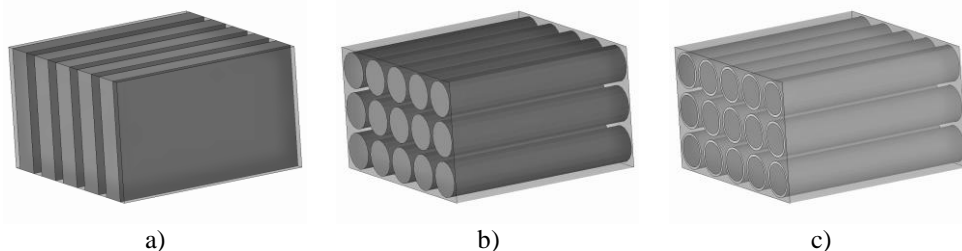
1.1. Kompozicinės medžiagos

Kompozicinėmis vadinamos medžiagos, sudarytos iš kelių skirtingas chemines ar mechanines savybes turinčių sudėtinių medžiagų, į gaminamą struktūrą įeinančių stambiomis dalimis. Paprastai viena medžiaga būna rišančioji (vadinama matrica), kurioje patalpintas užpildas (sutvirtinanti medžiaga). Kompozitai klasifikuojami pagal sudedamųjų medžiagų tipą (metalas, keramika, polimerai, anglis ir t. t.) arba pagal užpildo struktūrą (dalelės, gijos ir pan.). Papildomai kompozitai skirstomi pagal gijų ilgį (ilgos, trumpos), struktūrą (reguliari, atsitiktinė), išdėstymą (vienkrypčiai, daugiakrypčiai (supinti)), sluoksnių skaičių (viensluoksniai, daugiassluoksniai) [4–6]. Keičiant medžiagų sudedamąsias dalis, vidinę struktūrą galima sukurti dirbtines medžiagas, turinčias norimas savybes. Pavyzdžiui, sukurtos dirbtinės kompozicinės medžiagos, turinčios neigiamą Puasono koeficientą – traukiasi gniuždomos ir plečiasi tempiamos [7, 8]. Dėl sukurto gero masės ir tvirtumo santykio, patvarumo, stiprumo kompozitai naudojami lėktuvų ir laivų pramonėje [9–11], sporto įrenginiams [12], neperšaunamiems drabužiams ir šalmsams gaminti [13–16], kaulų implantams operacijų metu [17], dantų implantams, sąnarių ir galūnių protezams gaminti [18].

Vienkrypčiai kompozitai yra medžiaga, sudaryta iš ilgų gijų, išsidėsčiusių vienoda kryptimi ir įterptų matricos medžiagoje. Skaitiniuose modeliuose daroma prielaida, kad gijos yra begalinio ilgio – gijų pradžia ir pabaiga nėra nagrinėjama. Jeigu gijos yra pagamintos iš kur kas standesnės medžiagos nei matricos medžiaga, vienkryptis kompozitas priklauso lanksčių kompozitų grupei. Tokiu atveju gijų kryptimi kompozicinės medžiagos standumas yra kur kas didesnis nei gijoms statmena kryptimi. Jei medžiaga veikiama gijoms statmena kryptimi arba sukuriama šlytis, kompozito elgseną valdo matricos medžiaga [19], tačiau įtakos turi ir gijų medžiaga [20]. Tam, kad būtų išlaikomos medžiagos savybės visoje nagrinėjamoje srityje, medžiagos sluoksniai klojami įvairiomis kryptimis [21].

Pagal vienkrypčio kompozito analizės išsamumą modeliai skaidomi į tokius [20].

- Nulinės eilės – medžiagos parametrams apibrėžti naudojama tik gijų medžiaga. Ekvivalentus Jungo modulis gijoms statmena kryptimi ir Puasono koeficientas lygūs nuliui. Šis modelis naudojamas, kai reikia modeliuoti sistemas, kur pagrindinės apkrovos patiriamos gijų kryptimi.
- Pirmos eilės – vienkrypčio kompozito modelis susideda iš matricos ir gijų medžiagos juostų (stačiakampių gretasienių) atitinkamomis dalimis (1.1 pav., a).
- Antros eilės – vienkrypčio kompozito modelyje įvertinama gijų forma, išdėstymas (1.1 pav., b).
- Aukštesnės eilės – įvertinami galimi defektai, netolygus gijų išdėstymas, intarpai, gijų ir matricos sąveika (1.1 pav., c).



1.1 pav. Vienkrypčio kompozito modeliai: (a) – pirmos eilės, (b) – antros eilės, (c) – aukštesnės eilės, įvertinant sąveiką tarp gijų ir matricos medžiagos

1.2. Daugiaskaliai modeliai

Sudėtingų sistemų tiesioginė analizė nėra praktiška dėl didelio analizuojamų duomenų kiekio, keliamų prielaidų įvairovės. Siekiant sumažinti skaičiavimo išteklius taikomas daugiaskalis modeliavimas – sudėtinga struktūra nagrinėjama keliose skalėse. Šis metodas taikomas fizikinių, cheminių, biologinių sistemų modeliavimui. Biomedicinoje taikant daugiaskalį modeliavimą prognozuojamas auglio vystymasis [22], analizuojama regos nervų sąveika [23]. Kompozicinių audinių skaitinis modeliavimas, struktūros optimizavimas keliose skalėse taikomas tamprumo, stiprumo, trūkimo parametrų nustatymui, smūginio poveikio, pramušimo analizei ir kitose tyrimų srityse [24].

Daugiaskaliai modeliai charakterizuojami skalių skaičiumi, sistemos modeliavimo tvarka, skalės siejančiais ryšiais [25]. Kelių skalių modelio kūrimas prasideda nuo skalių skaičiaus, apibrėžto pagal žinomus ir ieškomus dydžius, po to kiekvienoje skalėje sukuriama nagrinėjamos skalės prielaidas atitinkantis modelis, apibūdinami ryšiai tarp modelių skirtingose skalėse.

Modeliavimo metu naudojamų skalių skaičius priklauso nuo nagrinėjamos sistemos sudėtingumo. Skalės siūloma parinkti taip, kad smulkesnės skalės eilė būtų kur kas mažesnė už stambesnės skalės ir bangos, sklindančios šioje pakopoje, eiles [26, 27]. Gamtoje pasitaikančiose sistemose vyrauja skalės, kurių eilė svyruoja $10^{-10}m < l < 10^3m$, todėl fizinėje aplinkoje įmanomas 5–6 skalių derinys. Jei sistemos sprendiniai randami skaitiniais metodais (pavyzdžiui, baigtinių elementų metodu), įvertinus kompiuterių darbo sąnaudas praktiška skaičiuoti ne daugiau nei tris skalės, todėl daugiaskaliai modeliai paprastai sudaromi dviejose ar trijose skalėse – makro, mezo, mikro.

Nagrinėjant kompozicines medžiagas paprastai žinomos sudėtinių medžiagų mechaninės ir cheminės savybės, kompozito sandara mikroskalėje. Tačiau dažniausiai reikia modeliuoti iš kompozito pagamintų produktų, kurių matavimai keliomis eilėmis didesni nei sudėtinių medžiagų dalelės, atsaką globaliam poveikiui. Iš kompozicinių medžiagų pagamintiems objektams nagrinėti taikomas daugiaskalis modelis, kai sudėtinga struktūra nagrinėjama „nuo apačios į viršų“ – nuo smulkausios skalės iki stambiausios. Stambiausioje skalėje nagrinėjama kompozito elgsenos priklausomybė nuo globalių veiksnių (temperatūros, mechaninio poveikio ir pan.). Šioje skalėje neatsižvelgiama į sudedamųjų dalių geometriją, sandarą, dydį. Vienkrypčių kompozitų atveju tariama, kad medžiaga stambiausioje skalėje yra homogeninė

ortotropinė, todėl modeliuojant reikia įvertinti medžiagos koordinacių sistemos ašis (gijų kryptį) [28]. Vidutiniame (mezo) lygyje nagrinėjama sudėtinių medžiagų elgsena ir struktūra, sąveika, tačiau šioje skalėje modeliuojama geometrinė kompozito struktūra yra kur kas bendresnė ir grubesnė nei mikroskalės atveju. Be to, vidutinėje skalėje galima vertinti kontaktą, trintį tarp keliomis kryptimis suklotų lakštų, kurie sudaryti iš kelių vienkrypčių sluoksnių. Pavyzdžiui, gijos, supintos iš kelių siūlų, audiniuose modeliuojamos tūriniais arba kevalo baigtiniais elementais. Toks požiūris leidžia modeliuoti audinio raštą ir kontaktą tarp atskirų gijų [29–31]. Jeigu sudaromas trijų skalių modelis, smulčiausiame (mikro) lygyje nagrinėjama gijos sandara.

Kitas skalių ryšių pavyzdys – kai makromodelio elemento sprendiniai tikslinami smulkesnėje skalėje, t. y. kiekvienam makromodelio elementui sprendiniai perskaičiuojami atsižvelgiant į vidinę struktūrą. Tokios procedūros veiksmų skaičius gali būti gerokai sumažintas, jeigu vienetiniam elementui įtempių lygtys sprendžiamos tik tais atvejais, kai sudėtinės medžiagos nebėra tiesinės [32].

Naudojant daugiaskalius modelius nustatomi kompozitų ekvivalentūs medžiagos tamprumo [28, 33, 34], šiluminio laidumo [35] parametrai, modeliuojamas suirimas [36, 37], įvertinama sudedamųjų medžiagų dalies įtaka medžiagos savybėms [38, 39].

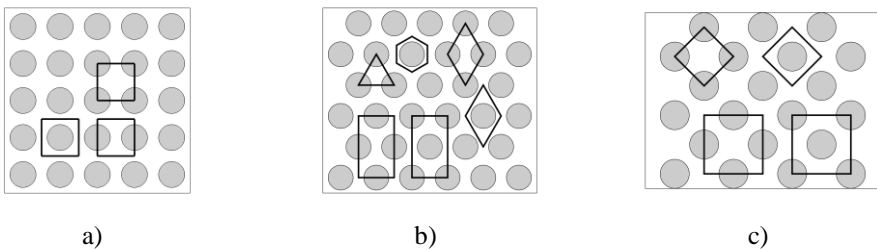
1.3. Kompozito reprezentatyvusis elementas ir kraštinės sąlygos

Tradiciskai reprezentatyvusis elementas (RE) apibrėžiamas kaip minimalaus dydžio sritis, kuri statistiskai atspindi vidinę struktūrą [40]. Jeigu nagrinėjamas kompozitas su atsitiktiniu gijų išdėstymu, struktūroje turi būti įtrauktos visos heterogeninės savybės, pasitaikančios kompozite [41]. Tokiu atveju mikrostruktūra geriausiai aprašoma reprezentatyviuoju elementu, kuriame dalelių skaičius artėja į begalybę (pakankamai didelis skaičiuojamam modeliui) [42]. Jeigu sudarytas modelis su prielaida, kad vidinė struktūra yra ideali ir periodinė, vienas periodinis elementas atspindi visą vidinę struktūrą [43] ir didesnis gijų skaičius smulčiausios skalės modelyje neturi reikšmingos įtakos mechaninei elgsenai [44]. Literatūroje formuluojami reikalavimai, kad reprezentatyvusis elementas turi turėti pakankamai informacijos apie vidinę struktūrą ir apimti visus galimus nevientisumus, būti kur kas mažesnis už makroskalėje nagrinėjamą objektą ir didesnis už struktūros elementus, statistiskai atspindėti medžiagos elgseną makroskalėje [40].

Atliekant reprezentatyviojo elemento analizę keliamas periodinių kraštinių sąlygų reikalavimas [3, 45, 46]. Elemento periodiškumas gali būti užtikrinamas elemento kraštinėms suteikiant homogeninius poslinkius (šlyties atveju kraštinės sienos lieka tiesios), vienodas jėgas arba periodinius poslinkius apibrėžiant tinkamas įtempių ir poslinkių kombinacijas (šlyties atveju nekliamas reikalavimas, kad kraštinės sienos liktų tiesios) [47]. Kraštinės sąlygos, kai sukuriama šlytis, o reprezentatyviojo elemento sienos lieka tiesios, yra per daug ribojančios dėl susidarančių įtempių koncentracijų [3, 48]. Kad būtų išvengta įtempių koncentracijų, vertinant ekvivalentčius parametrus iš periodinio elemento siūloma taikyti grynųjų įtempių modelį, kai kraštinėms sienoms leidžiama deformuotis laisvai [49] ir sienų mazgai veikiami nustatyto dydžio jėga [50], arba suteikti tokius poslinkius, kokius patiria didesnės struktūros viduryje esantis elementas [48]. Dauguma baigtinių

elementų programų paremtos potencinės energijos minimumo arba virtualių poslinkių principu, todėl natūralios kraštinės sąlygos tenkinamos automatiškai, kai energija minimizuojama, ir jų nereikia nurodyti skaičiavimų pradžioje [51]. Kitas kraštinių sąlygų tipas – daugiaskalės periodinės kraštinės sąlygos, įvertinamos su prielaida, kad reprezentatyvusis elementas patalpintas begalinėje srityje. Periodinio elemento kraštinių sienų poslinkių reikšmės siūloma apskaičiuoti remiantis kevalo teorija [52]. Tariaama, kad bet kokios kraštinės sąlygos, suteikiamos reprezentatyviajam elementui analizės metu, yra tinkamos, jei elemento ir iš daugelio tokių elementų sudarytos struktūros elgsenos skiriasi nereikšmingai esant vienodoms kraštinėms sąlygoms [46].

Gaminant vienkrypčius kompozitus praktiškai neįmanoma užtikrinti tvarkingo gijų pasiskirstymo medžiagoje. Gali būti atliekama vienkrypčio kompozito dominančios srities analizė, kai gijos išsidėsčiusios atsitiktinai [53]. Tačiau toks modeliavimas netinka, jeigu siekiama nustatyti ekvivalenčius medžiagos parametrus ir modeliuoti kompozicinio gaminio elgseną. Todėl idealiu atveju tariama, kad medžiaga yra ideali (nėra trūkimų, gijos lygiagrečios, tiesios), su periodine struktūra. Pagal gijų sudedamąją dalį gali būti parenkamas gijų skirstymo modelis – kvadratinis, rombinis (gaunamas pasukus kvadratinį 45° kampu) arba šešiakampis [46]. Pirmaisiais dviem skirstinio atvejais reprezentatyviojo elemento skerspjūvis kvadratinis (1.2 pav., a, c). Jei kompozito gijų dalis neviršija 78,5 %, vidinę struktūrą gerai apibūdina kvadratinis išdėstymas [54]. Šešiakampio skirstinio modelis ribojamas ~91 % gijų dalies [55]. Vis dėlto praktikoje dėl netolygaus gijų išdėstymo, bangavimo sunku pagaminti kompozitus, kurių užpildymas vienakryptėms struktūroms didesnis nei 75 % [55], todėl dažniausiai modeliuojant taikomas paprasčiausias – kvadratinis – išdėstymas. Tokio išdėstymo reprezentatyvusis elementas – kube gijų kryptimi patalpintas cilindras (gija) [46]. Jeigu nagrinėjamas kitokio laipsnio užpildymas arba žinoma, kad gijų skerspjūvis nėra apvalus, gali būti modeliuojamos ir kitokio skerspjūvio gijos. Pavyzdžiui, skerspjūvis gali būti stačiakampis [56], elipsinis [57], abipusiai iškilas (lęšio formos), stačiakampis užapvalintais galais [6]. Šešiakampio skirstinio atveju reprezentatyviojo elemento skerspjūvis gali būti stačiakampio, trikampio, šešiakampio ar rombo formos [6, 58–60] (1.2 pav., b).



1.2 pav. Vienkrypčio kompozito gijų išdėstymo tipai ir reprezentatyviųjų elementų pavyzdžiai: a) – kvadratinis išdėstymas, b) – šešiakampis išdėstymas, c) – rombinis išdėstymas

Reprezentatyviojo elemento vidinė struktūra smulkiausioje skalėje aprašoma kiek norima išsamiai, atsižvelgiant į skaičiavimams naudojamos programos išteklius ir norimą tikslumą. Reprezentatyvusis elementas gali būti skaidomas baigtiniais

elementais gijos skerspjūvio krašto taškus jungiant linijomis [28, 46, 61], arba skerspjūvis dalijamas stačiakampiu (nebūtinai reguliarium) tinkleliu, o gijos skerspjūvio kraštinė aproksimuojama tinklelio linijomis [62, 63].

1.4. Kompozito tiesinių tamprumo ir suirimo parametrų nustatymas

Kompozitų modeliavimo metodika, kai pagal heterogeninės medžiagos struktūrą apskaičiuojami ekvivalentūs parametrai, vadinama homogenizavimu. Homogenizuotos medžiagos elgsena turi atitikti heterogeninės medžiagos elgseną. Daugelis homogenizavimo metodikų yra paremtos tiesiogine reprezentatyviojo elemento analize baigtinių elementų metodu, kai smulkioje skalėje taikomos kraštinės sąlygos gaunamos iš stambios skalės modelio ir apskaičiuoti rezultatai grąžinami atgal į stambią skalę. Tokia metodika tiksliai apibūdina elgseną, tačiau jai reikia daug skaičiavimo išteklių [64]. Siekiant sumažinti skaičiavimų apimtį stambioje skalėje daroma prielaida, kad medžiaga homogeninė, o jos parametrai apskaičiuojami iš smulkios skalės modelio įvertinant medžiagos vidinę struktūrą [38, 48].

Tiesiniai kompozito tamprumo parametrai gali būti nustatomi iš reprezentatyviojo elemento analizės asimptotiniu homogenizavimu, baigtinių elementų metodu įvertinant vidutinį įtempį ar deformacijų lauką, mišinio ar pusiau empirinėmis formulėmis [49, 64]. Šie metodai taikomi modelių keliose skalėse apibendrinimui, ir skaičiavimai atliekami smulkiausioje skalėje, nes parametrai idealizuoto kompozito atveju nustatomi iš vieno periodinio reprezentatyviojo elemento, kuriuo aprašomos visos medžiagos heterogeninės savybės. Analitiniai parametrų įvertiniai išvedami su prielaida, kad sudedamosios medžiagos yra izotropinės. Tokia pati prielaida taikoma ir kituose analizės metoduose [38]. Tačiau realybėje gijos yra sudarytos iš siūlų, ir jų medžiaga nėra izotropinė. Tuo remiantis siūloma gijų medžiagą nagrinėti kaip ortotropinę, kurios savybės gijos skerspjūvio plokštumoje sutampa, bet skiriasi gijų kryptimi [65].

Asimptotinio homogenizavimo metu analizuojamas reprezentatyvūs elementas su periodinėmis kraštinėmis sąlygomis lokaliajoje koordinačių sistemoje (smulkiausioje skalėje), o globaliojoje koordinačių sistemoje (stambiausioje skalėje) sudaromas nagrinėjamo objekto modelis [2, 38]. Asimptotinės analizės metodu gali būti nagrinėjama gijų formos įtaka medžiagos tamprumo parametrui. Buvo atlikti skaitiniai tyrimai siekiant įvertinti, kaip kinta kompozito tamprumo savybės, jei skirtinguose laminato sluoksniuose naudojamos skirtingų skerspjūvių (elipsių) gijos [57]. Šiuo metodu gali būti vertinami ne tik tamprumo ekvivalentūs parametrai, bet ir pjezoelektrinis modulis (iš elektrinio lauko poslinkių), įvertinamas neidealus ryšys tarp sudedamųjų medžiagų [66].

Kitas metodas tiesinių parametrų (tamprumo tenzorius) nustatymui – baigtinių elementų analizė, kai periodinei struktūrai sukuriama nepriklausoma deformacija. Nors gali būti taikomos bet kokios nepriklausomos deformacijos, paprastai parenkama deformacija pagal koordinačių ašis [67]. Jei analizėje naudojamas pirmos eilės reprezentatyvūs elementas, sukuriama trys deformacijos [68], jei antros – šešios [28]. Elementas deformuojamas globaliesiems mazgams suteikiant atitinkamas įtegas [67] arba poslinkius [48].

Ekvivalenčių parametų įvertinimui gali būti taikomos plokščiųjų įtempių [4, 69, 70] arba plokščiųjų deformacijų [16, 28, 71] prielaidos. Atsižvelgiant į kompozito modelį ir pasirinktas prielaidas, parametų nustatymui gali pakakti atlikti reprezentatyviojo elemento ketvirčio analizę (jei įvertinamos simetrijos sąlygos) [49]. Jei reprezentatyviajam elementui ar jo ketvirčiui (su simetrinėmis sąlygomis) taikomos periodinės sąlygos, baigtinių elementų metodu apskaičiuoti tamprumo įverčiai gerai atitinka eksperimentinius rezultatus [48]. Taikant tokią metodiką galima nustatyti ir trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintos struktūros ekvivalenčius tamprumo parametrus, jeigu žinomi šešiomis skirtingomis kryptimis spausdinto bandinio eksperimentiniai tempimo bandymo rezultatai [72]. Atlikti eksperimentiniai tyrimai rodo, kad vienkrypčio kompozito Jungo modulis gijų kryptimi yra didžiausias, o mažiausias Jungo modulis globaliojoje sistemoje gaunamas, jei gijos pasuktos apytikriai 60° kampu. Eksperimento rezultatai atitinka skaitinių eksperimentų baigtinių elementų metodu rezultatus, kai nagrinėjama nedidelė sritis (vienetinis elementas) su pasuktomis gijomis [73].

Analitinėmis formulėmis vienkrypčio kompozito tiesiniai parametrai gali būti vertinami, jei žinoma sudedamųjų medžiagų dalis ir gijų kryptis sutampa su viena iš medžiagos koordinačių ašių [74]. Formulės išvedamos pirmos eilės vienkrypčiam kompozitui su prielaidomis, kad tempiant gijų kryptimi kompozite tolygiai pasiskirsto deformacijos, o gijoms statmena kryptimi – įtempiai [19, 20]. Gaunami skirtingi Jungo modulio gijoms statmena kryptimi įverčiai, jeigu vertinamos dėl šlyties atsiradusios deformacijos [20, 75] arba jos laikomos lygiomis nuliui [19, 38]. Pusiau empiriniuose įverčiuose mišinio formulės nariams įvedami pataisos daugikliai [49].

Ir asimptotinio homogenizavimo metodu, ir atliekant reprezentatyviojo elemento analizę, kai sukuriama nepriklausomos deformacijos, tiesiniai parametrai išreiškiami iš paslankumo matricos. Teigiama, kad asimptotinio homogenizavimo metodu koeficientai nustatomi atliekant mažesnę veiksmų skaičių lyginant su parametrais, apskaičiuotais grynųjų deformacijų požiūriu. Vis dėlto grynųjų deformacijų požiūriu įvertinti parametrai yra tikslesni ir jais geriau įvertinami ekvivalentūs parametrai sudėtingos mikrostruktūros atveju [71].

Vienkryptis kompozitas silpnėja dėl matricos ar gijų medžiagos trūkimo, atsiskyrimo tarp sluoksnių [6]. Vienkrypčio kompozito elgseną tempimo gijų kryptimi atveju lemia gijų medžiaga, jeigu gijos sudarytos iš kur kas standesnės medžiagos nei matrica [76]. Kompozito stiprumui nusakyti šia kryptimi gali būti taikomas maksimalių įtempimų kriterijus [77] arba analitinis įtempių įvertis ekvivalenčiai medžiagai, kurios standumas apskaičiuotas pagal kompozito mišinio taisyklę, kai pasiekiamas maksimalus gijų pailgėjimas [20]. Gijų suirimas lemia didelį medžiagos susilpnėjimą. Apkrovos gijoms statmena kryptimi arba šlyties atveju kompozito elgseną lemia matricos medžiaga, o suirimas labiausiai tikėtinas matricos ir gijų sandūroje, matricos medžiagoje arba gijoje, jei medžiagos gijos sudarytos iš plonų siūlų, kurie lengvai atsiskiria paveikus gijoms statmena kryptimi [78, 79]. Kaip medžiagos stiprumo gijoms statmena kryptimi įvertis gali būti naudojama maksimalaus matricos medžiagos įtempimo vertė. Šlyties stiprumas nėra vertinamas analitiškai, tačiau iš praktikos žinoma, kad šlyties stiprumas didesnis už stiprumą gijoms statmena kryptimi [20].

Praktiškai taikant kompozicines medžiagas svarbu žinoti, kaip kompozito elgsena kinta pagal veikimo sąlygas, todėl atliekami skaitiniai eksperimentai, kai gijos pasuktos įvairiomis kryptimis [80]. Kompozito elgsenai tirti ir įvairiems parametrms nustatyti gali būti taikomas neašinis testas, kai ašinis tempimo testas atliekamas su bandiniu, kuriame gijos su tempimo ašimi sudaro kampą θ ir medžiaga veikiama kita negu optimalia (gijų) kryptimi [45, 81]. Pavyzdžiui, neašiniu testu galima nustatyti šlyties stiprumą [82, 83]. Keičiant gijų ir tempimo krypties kampą, kompozite keičiasi dominuojanti medžiaga, kai esant 0° posūkio kampui dominuoja gijos, o 90° – matricos medžiaga [81].

Jei tariama, kad medžiaga yra ideali ir periodinė (nėra defektų, gijos išsidėsčiusios lygiagrečiai ir t. t.), medžiagos stiprumo įvertis skirtingomis kryptimis gali būti apskaičiuojamas kaip maksimali vidutinė įtempių reikšmė baigtinių elementų metodu analizuotam vienam periodiniam elementui didinant apkrovas iki suirimo [84, 85]. Suirimo parametrų vertinimui gali būti taikoma kvazistatinė neišreikštinė analizė [86] ar dinaminė išreikštinė analizė [54, 87] su periodinėmis kraštinėmis sąlygomis. Jei medžiaga nėra periodinė, nagrinėjamas dominančios srities baigtinių elementų modelis iki suirimo [53].

Vienkrypčio kompozito medžiagos susilpnėjimui nusakyti gali būti taikomi maksimalių įtempių, maksimalių deformacijų [20], Hashin [88], Hoffman [89], Yamada-Sun [90], Tsai-Hill [91], Tsai-Wu [92] ir kiti pagrindinių kriterijų pagrindu sukurti kriterijai [84, 93, 94]. Susilpnėjimo sąlyga nusakoma įtempių, veikiančių elementą, kombinacija lokaliuosiose kompozito ašyse [20]:

$$F(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = 1; \quad (1)$$

čia σ_x – įtempiai gijų kryptimi, σ_y – įtempiai gijoms statmena kryptimi, τ_{xy} – šlyties įtempiai kompozito sluoksnio plokštumoje. Jei $F < 1$, elementas išlaiko savo stiprumą. Riba, kai elementas susilpnėja, pasiekama, kai $F = 1$. Tariama, kad elementas yra susilpnėjęs (pakito medžiagos savybės, nebegali pasiekti didesnių nei nustatyta įtempių ir t. t.), jei analizės metu buvo pasiekta kriterijaus reikšmė $F > 1$. Tradiciniai vienkrypčių kompozitų kriterijai, išreikškiami viena įtempių kombinacija, nesuteikia informacijos apie tai, kokio tipo suirimas patiriamas [89], todėl dažnai taikomas Hashin kriterijus, pagal kurį išskiriamos keturios suirimo būsenos – tempimas ir gniuždymas gijų bei gijoms statmena kryptimis [88]. Įtempiai sluoksnio storio kryptimi taikant suirimo kriterijų nevertinami, bet atsiskyrimas tarp kompozito sluoksnių nagrinėjamas kaip atskiras reiškinys – delaminacija [95].

1.5. Smūginio poveikio laminatams, audiniams ir vienkrypčiams kompozitams skaitinių tyrimų apžvalga

Kompozicinės medžiagos patiriamas poveikis klasifikuojamas į mažo greičio (didelės masės, iki 10 m/s), vidutinio greičio (10–50 m/s), didelio/balistinio greičio (mažos masės, 50–1000 m/s) ir hipergreičio (2000–5000 m/s) [96]. Kituose šaltiniuose pridėjama kvazistatinio (10–80 $\mu\text{m/s}$) poveikio kategorija, o poveikis skaidomas į mažo (1–10 m/s), didelio (10–60 m/s) ir balistinio greičio (200–1500 m/s) kategorijas [6].

Modeliuojant lanksčius kompozitus reikia įvertinti medžiagų suirimo parametrus, gretimų sluoksnių atsiskyrimą [79]. Lankstūs kompozitai dėl savo stiprumo ir lengvumo santykio populiarūs neperšaujamų drabužių gamyboje, todėl siekiama kuo tiksliau modeliuoti balistinį (dinaminį) poveikį tokioms medžiagoms. Jeigu kulkos deformacijos po kontakto nėra svarbios, kulka keičiama sfera [28, 74, 97–101] arba stačiakampiu gretasieniu kūnu [102]. Jei nagrinėjamas abipusis poveikis, modeliui išlaikoma kulkos forma [16, 29, 103].

Smūginio poveikio kompozitams modeliavimą daugiapakopiais modeliais galima suskirstyti į tris grupes. Pirmuoju atveju kompozitai makroskalėje modeliuojami tūriniais arba kevalo elementais, kurių medžiaga homogeninė su žinomais medžiagos parametrais, nurodytais gamintojo arba medžiagos duomenų bazėse [99, 102, 104–106], arba nustatytais iš reprezentatyviojo elemento [16, 28, 54, 74]. Antruoju atveju viename modelyje kombinuojami keli elementų tipai. Kontakto veikiamos gijos modeliuojamos tūriniais arba kevalo elementais įvertinant vidinę struktūrą, o tolimesnėje srityje naudojami homogeninės medžiagos elementai [29, 97, 107]. Trečiuoju atveju imama nedidelė poveikio sritis, kuri visa modeliuojama įvertinant medžiagos vidinę struktūrą [98, 103]. Vidinė struktūra taip pat gali būti modeliuojama skirtingais elementais: tūriniais – kontakto su sfera zonoje, kevalo – toliau esančioje srityje [30].

Smūginio poveikio modeliavimo baigtinių elementų tyrimų apžvalgose akcentuojama tinkamo medžiagos suirimo algoritmo (elementų ištrynimo kriterijaus parinkimo) svarba. Jeigu elementų ištrynimas atliekamas per vėlai, elementai gali ištįsti, persikreipti (išsigimti) ar įsiskverbti į gretimus elementus. Dėl šių priežasčių labai sumažėja integravimo žingsnis ir pailgėja skaičiavimo trukmė, modelio schema gali tapti nestabili. Todėl elementas turėtų būti ištrinamas, jeigu jis lemia integravimo žingsnio sumažėjimą iki tam tikros ribos [29, 99]. Kitas elemento panaikinimo kriterijus, taikomas kevalo elementams, – efektyvioji elemento suirimo deformacija (ESD), skaičiuojama kaip elemento deformacijų tenzoriaus narių kombinacija. ESD vertė turi būti pakankamai didelė, kad elementas iki ištrynimo pasiektų stiprumo ribas visomis kryptimis bei nebūtų ištrinamas per anksti, ir pakankamai maža, kad elementas nepatirtų deformacijų, stabdančių integravimo procesą [16].

1.6. Trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintos struktūros tyrimų apžvalga

Trimačio (3D) spausdinimo technologija populiarėja dėl galimybės pagaminti sudėtingos geometrinės struktūros gaminius, žemos sąnaudų kainos. Jeigu trimatis (3D) spausdinys naudojamas ne tik kuriant prototipą, bet ir realiuose gaminiuose, svarbu iširti jo mechanines savybes. Trimačio (3D) spausdinio stiprumą lemia medžiagos savybės ir vidinė struktūra – spausdintuvo liejamos medžiagos kelias. Atlikti tyrimai, kuriuose nagrinėjama spalvos, spausdinimo temperatūros, atstumo tarp gretimų spausdintuvo purkštuko kelių, spausdinimo rašto, sluoksnio storio įtaka spausdinio stiprumui [72, 108–111]. Išskiriama, kad reikšmingą įtaką spausdinio stiprumui turi gijų persidengimas (atstumas tarp gretimų gijų) ir raštas [112, 113], užpildymo procentas [111], priauginimo kryptis [108]. Struktūros mechaninių savybių nustatymui taikomi tempimo, trijų taškų lenkimo [114], gniuždymo [108]

testai. Paprastai trimačiai (3D) spausdiniai liejami iš polimerų, tačiau gali būti sustiprinti kitomis medžiagomis – džiuto gijomis, titano dioksidu [115].

Dėl gaminio nevientisumo, susidarancio spausdinant, trimačiu (3D) spausdintuvu pagaminta struktūra yra kompozicinė medžiaga. Todėl mechaninių savybių nustatymui gali būti taikomi tie patys metodai – asimptotinis homogenizavimas, analitiniai įverčiai [116]. Jeigu gaminyje spausdinimo keliai lygiagretūs, gaminį galima priskirti vienkrypčiams kompozitams (savybės statmenomis kryptimis yra skirtingos), o stambioje skalėje nagrinėti kaip ortotropinę medžiagą. Ortotropinės medžiagos tiesinių tamprumo savybių parametrai nustatomi iš paslankumo matricos; ši įvertinama pagal tempimo bandymų, kurių metu nagrinėjami bandiniai su šešiomis skirtingomis priauginimo kryptimis, rezultatus [117]. Teoriniai trimačio (3D) spausdinio vidinės struktūros modeliai siekiant paprastumo kuriami su prielaidomis, kad medžiaga po išpurškimo yra izotropinė, tiesiškai tampri, ryšys tarp medžiagos gijų yra idealus [116], gijų skerspjūvis yra skritulio formos [112]. Be to, atliekant teorinius skaičiavimus taikomi medžiagos parametrai iki išliejimo, nors išliejimo metu pakinta medžiagos mechaninės savybės [116].

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir apibendrinimas

Atlikus kompozicinių medžiagų skaitinių tyrimų apžvalgą galima padaryti tokias išvadas.

1. Kompozicinės medžiagos yra populiarios dėl galimybės gaminamai medžiagai suteikti pageidaujamas savybes. Atliekami kompozicinių medžiagų skaitiniai tyrimai leidžia nustatyti medžiagos savybių priklausomybę nuo vidinės struktūros, sudedamųjų medžiagų ir parinkti tinkamą vidinę struktūrą, sudedamųjų medžiagų proporcijas prieš pradedant medžiagos gamybą.
2. Kompozicinių medžiagų modeliavimui taikomi daugiaskaliai modeliai, kurie leidžia kompozitus analizuoti skirtingose skalėse su skalę atitinkančiomis prielaidomis ir sutaupyti skaičiavimo išteklius.
3. Pagal gijų užpildymo laipsnį praktiškai naudojamų vienkrypčių kompozitų idealizuotą atvejį galima aprašyti pirmos arba antros eilės su kvadratiniais gijų išdėstymu vienkrypčio kompozito modeliu. Tada ekvivalentūs parametrai gali būti įvertinami skaitinės analizės metu iš reprezentatyviojo elemento su periodinėmis kraštinėmis sąlygomis. Tiesinių tamprumo parametrų (tiesinio įtempio ir deformacijų sąryšio galiojimo ribose) nustatymui gali būti taikomas asimptotinis homogenizavimas, reprezentatyvios struktūros analizė baigtinių elementų metodu ar mišinio formulės, tačiau netiesiniams parametrams nustatyti ir elemento ištrynimo kriterijui parinkti tiesioginių algoritmų literatūroje nėra pateikiama.
4. Vienkrypčio kompozito parametrai, kuriais įvertinama medžiagos elgsena neašinės apkrovos atvejais, gali būti nustatomi atliekant elemento, kuriuo aprašoma medžiagos struktūra su pasuktomis gijomis, analizę.
5. Smūgio poveikio tyrimuose taupant skaičiavimų apimtis sferos ar kulkos veikiami kompozito sluoksniai modeliuojami kevalo elementais su prielaida, kad

- medžiaga yra homogeninė ortotropinė. Kompozito vidinę struktūrą atspindinti geometrija turėtų būti modeliuojama tik pačiose svarbiausiose (poveikio) srityse.
6. Trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintos struktūros gali būti nagrinėjamos kaip kompozicinės medžiagos.

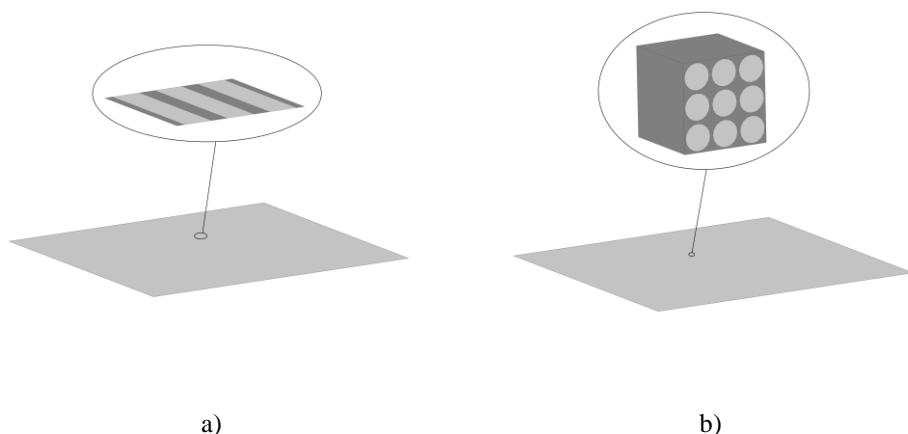
Norint sukurti daugiaskalį skaitinį modelį lanksčių vienkrypčių kompozitų dinamikos analizei, reikia išspręsti šiuos uždavinius.

1. Sudaryti daugiaskalius skaitinius modelius – nustatyti modelį sudarančių skalių skaičių, nagrinėjamos kompozicinės struktūros reprezentatyviojo posričio detalumą smulkioje skalėje (taikomas dvimačių ar trimačių baigtinių elementų modelis).
2. Parinkti tinkamas reprezentatyviojo posričio kraštines sąlygas ekvivalentiems tamprumo bei stiprumo parametrų ir elemento panaikinimo kriterijui taikomoms vertėms nustatyti.
3. Verifikuoti sukurtus daugiaskalius modelius sudarant tempimo plokštumoje skaitinius eksperimentus kompozitui su smulkiausios skalės modelyje nustatytais parametrais ir palyginti su atskaitos modelio rezultatais.
4. Verifikuoti sukurtus daugiaskalius modelius sprendžiant kompozito su smulkiausios skalės modelyje nustatytais parametrais bei absoliučiai kietos sferos smūginio kontakto sąveiką ir lyginant rezultatus su gautais taikant vidinę geometriją įvertinančią atskaitos kompozito modelį.
5. Sudaryti dviejų skalių skaitinį modelį trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintai struktūrai, smulkioje skalėje įvertinti gaminio vidinę geometriją, o stambioje skalėje gautus tempimo ir lenkimo bandymų skaitinių eksperimentų rezultatus palyginti su fizikinių eksperimentų rezultatais.

2. METODIKA (MODELIAVIMO PRINCIPAI)

2.1. Daugiaskalis modelis

Vienkrypčiam kompozitui nagrinėti sudaromas dviejų skalių modelis „nuo apačios į viršų“ (nuo smulčiausios skalės stambiausios link) su pasirinktu detalumo lygiu smulkioje skalėje (2.1 pav.). Tariama, kad smulkioje skalėje žinomos sudedamųjų medžiagų savybės, kompozito vidinė struktūra. Gijų ir matricos medžiagos tamprumo parametrai skiriasi reikšmingai, o gijų medžiaga yra kur kas standesnė nei matricos. Smulkioje skalėje atsižvelgiant į vidinę kompozito struktūrą reikia įvertinti ekvivalenčius medžiagos parametrus (Jungo modulius medžiagos koordinatinių sistemos kryptimis, Puasono koeficientus, šlyties modulius, stiprumo ribas, suirimo deformacijos vertę). Stambioje skalėje modeliuojamas poveikis objektui su prielaida, kad medžiaga yra homogeninė su smulkioje skalėje nustatytais parametrais.

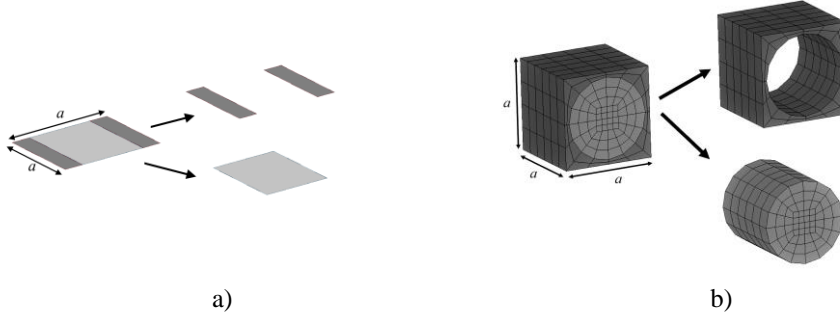


2.1 pav. Daugiaskalių modelių schemas, naudojamos vienkrypčių kompozitų mechaninės elgsenos modeliavimui, kai smulčiausioje skalėje kompozitas aprašomas pirmos eilės modeliu (a) arba antros eilės modeliu (b), o stambioje skalėje daroma prielaida, kad medžiaga yra homogeninė ortotropinė

Nagrinėjamas vienkrypčio kompozito idealizuotas modelis, kai gijos tarpusavyje lygiagrečios, nepersidengiančios, o kontaktas tarp matricos ir gijų medžiagos yra idealus. Smulkioje skalėje nagrinėjami dviejų tipų – pirmos ir antros eilės – kompozito modeliai. Tariama, kad gijų kryptis sutampa su medžiagos koordinatinių sistemos X ašimi. Pirmos eilės kompozito modelio reprezentatyvusis elementas (2.2 pav., a) sudaromas iš kevalo elementų taip, kad periodiniame elemente gijų ir matricos sudedamosios dalys atitiktų nagrinėjamos medžiagos sudedamąsias dalis. Tokio tipo modelis analizuojamas preliminariam parametų ir kraštinių sąlygų nustatymui. Su pirmos eilės kompozito struktūra lyginama homogeninės medžiagos su ekvivalenčiais parametrais modelio elgsena stambioje skalėje. Antros eilės kompozito modelis (2.2 pav., b) sudaromas kvadratinio išdėstymo gijoms, o reprezentatyvusis elementas naudojamas tiesinių, netiesinių ir suirimo parametų

nustatymui. Periodinis elementas sudarytas iš cilindrinės formos gijos, įterptos matricos kube.

Baigtinių elementų modelių analizei naudojami dvimačiai (kevalo) ir tūriniai elementai. Smulkiroje skalėje tamprumo parametrų nustatymui taikomas reguliarus skaidymas, sudarytas iš 4 mazgų kevalo elementų pirmos eilės modeliui ir 8 mazgų tūrinių elementų antros eilės modeliui. Jei atliekama pasukto medžiagos fragmento analizė, taikomas skaidymas, sudarytas iš trikampių elementų pirmos eilės modeliui ir iš 4 mazgų tūrinių elementų antros eilės modeliui. Pirmos eilės modelis nagrinėjamas tik XY plokštumoje, todėl nevertinama koordinatė Z ašimi.



2.2 pav. Vienkrypčio kompozito pirmos eilės (a) ir antros eilės (b) modelio reprezentatyviojo elemento sandara

Stambioje (makro) skalėje analizuojamas poveikis objektui, modeliuojamam iš homogeninės (vientisos) ortotropinės medžiagos su smulkiroje skalėje gautais parametrų įverčiais. Taip gali būti tiriamas smūginis poveikis, kai dideliu greičiu judanti sfera atsitrenkia į kompozicinės medžiagos lakštus (vieną ar kelias skirtingais kampais pasuktas plokšteles), arba tempimas. Stambioje skalėje homogeninės medžiagos modeliui naudojamas reguliarus stačiakampis kevalo elementų tinklelis.

2.1.1. Kevalo elementų lygtys

Kevalo elementas apibrėžiamas medžiagos savybėmis, mazgų koordinatėmis, vidurinio paviršiaus normalėmis ir storiu kiekviename vidurinio paviršiaus mazge. Bet kuris kevalo taškas gali būti nusakytas naudojant vidurinio paviršiaus mazgų koordinates ir vektoriumi, jungiančiu apatinį bei viršutinį paviršius [118]:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_k N_k(\xi, \eta) \left(\begin{Bmatrix} \tilde{x}_k \\ \tilde{y}_k \\ \tilde{z}_k \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \zeta h_k \mathbf{v}_k \right); \quad (2)$$

čia $N_k(\xi, \eta)$ – k -tojo mazgo formos funkcija, ζ – izoparametrinė koordinatė storio kryptimi, $\tilde{x}_k, \tilde{y}_k, \tilde{z}_k$ – k -tojo mazgo koordinatės, h_k – elemento storis k -tajame mazge, \mathbf{v}_k – kevalo plokštumos normalė. $\tilde{}$ žymimos baigtinių elementų modelio tinklelio mazgų vertės.

Jei storio pokytis nėra nagrinėjamas – deformacija storio kryptimi lygi 0, kiekvieno mazgo poslinkiai $\tilde{\mathbf{u}}_k$ vienareikšmiškai apibrėžiami vidurinio paviršiaus mazgų poslinkiais $\tilde{u}_k, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k$ atitinkamai X, Y bei Z ašimis ir dviem posūkiais $\tilde{\alpha}_k$ bei

$\tilde{\beta}_k$ apie ortogonaliasis ašis, apibrėžiamas vektoriui $\mathbf{v3}$ ortogonaliais vektoriais $\mathbf{v1}$ ir $\mathbf{v2}$:

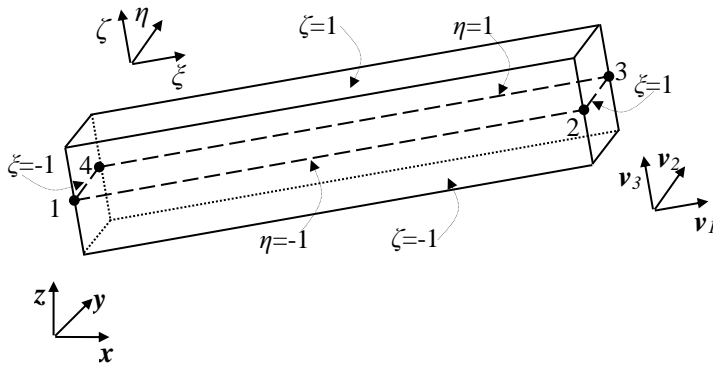
$$\tilde{\mathbf{u}}_k = \{\tilde{u}_k \quad \tilde{v}_k \quad \tilde{\omega}_k \quad \tilde{\alpha}_k \quad \tilde{\beta}_k\}. \quad (3)$$

Vektorius \mathbf{t} Dekarto koordinatų sistemoje gali būti išreiškiamas forma $\mathbf{t} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$; čia $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ – baziniai vektoriai. Tada vektoriai $\mathbf{v1}$ ir $\mathbf{v2}$ konstruojami pagal formules [118]:

$$\mathbf{v1} = \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{v3}}{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{v3}|}, \quad \mathbf{v2} = \frac{\mathbf{v3} \times \mathbf{v1}}{|\mathbf{v3} \times \mathbf{v1}|}. \quad (4)$$

Bet kurio kevalo taško poslinkiai apskaičiuojami pagal vidurinio paviršiaus mazgų poslinkius [118]:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_k N_k(\xi, \eta) \left(\begin{Bmatrix} \tilde{u}_k \\ \tilde{v}_k \\ \tilde{\omega}_k \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \zeta h_k [\tilde{\mathbf{v}}\mathbf{1}_k \quad -\tilde{\mathbf{v}}\mathbf{2}_k] \begin{Bmatrix} \tilde{\alpha}_k \\ \tilde{\beta}_k \end{Bmatrix} \right) \quad (5)$$



2.3 pav. 4 mazgų kevalo elementas

Pagal tai, kokios jėgos veikia elemento mazgus skaitinio eksperimento metu, 4 mazgų kevalo elementas (2.3 pav.) gali deformuotis taip, kad jo mazgai nebepriklausys vienai plokštumai. Todėl elemento standumo koregavimui gali būti įvedama standžių jungčių korekcija [119, 120]. Elementų tinklelis formuojamas taip, kad gretimi elementai turėtų bendrus mazgus. Tačiau galimas ir kitas tinklelio formavimo būdas, kai gretimiems elementams priklausančių mazgų ryšys įvertinamas standžiomis jungtimis (taikomas baudos metodas), Lagranžo daugianariais arba pagrindinių bei šalutinių mazgų metodu [121, 122].

2.1.2. Medžiagų modeliai

Tariama, kad medžiagos, naudojamos analizei mikroskalėje, yra izotropinės. Izotropinės medžiagos tiesinės tamprumo savybės aprašomos Jungo moduliū E , Puasono koeficientu ν , o šlyties modulis G apskaičiuojamas pagal formulę [69]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (6)$$

Pirmos eilės vienkrypčio kompozito modeliui skaičiuojant taikoma izotropinės medžiagos tamprumo matrica plokštuminiam įtemptosios būsenos uždaviniui ($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) [118]:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Antros eilės modeliui skaičiuojant taikoma izotropinės medžiagos matrica [69]:

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Netiesinėms smulkioje skalėje naudojamų medžiagų savybėms nusakyti pakanka takumo ribos ir efektyviosios nutrūkimo deformacijos. Ekvivalenčių netiesinių parametrų (stiprumo gijų ir gijoms statmena kryptimi, šlyties) taikoma išreikštinė analizė, todėl reikia nurodyti ir sudedamųjų medžiagų tankius.

Vienkryptis kompozitas stambioje skalėje modeliuojamas kaip ortotropinė medžiaga. Ortotropinės medžiagos tamprumas tiesiniu atveju apibrėžiamas Jungo moduliais gijų ir gijoms statmenomis kryptimis (E_x, E_y, E_z), Puasono koeficientu (ν_{yx}) ir šlyties moduliais (G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}). Medžiagos parametrai, taikomi netiesinei kompozito elgsenai apibūdinti – stiprumas gijų ir gijoms statmena kryptimis (XT, YT), šlyties stiprumas (SC) ir juos atitinkančios deformacijos ($\varepsilon_{XT}, \varepsilon_{YT}, \gamma_{SC}$).

Tiesiniai ortotropinės medžiagos parametrai išreiškiami iš homogenizavimo metu apskaičiuotos paslankumo matricos \mathbf{S} (atvirkštinė tamprumo matricai). Iš pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio analizės gauta paslankumo matrica turi formą [69]:

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio atveju šlyties moduliai G_{yz} ir G_{zx} nėra vertinami, tačiau homogeninės medžiagos modelyje šie dydžiai privalo turėti nenulines vertes, kad būtų užtikrintas modelio stabilumas. Skaičiuojant siūloma taikyti įvertintą šlyties modulį G_{xy} ir daroma prielaida, kad šlyties moduliai kitose plokštumose G_{yz} ir G_{zx} yra 100 kartų mažesni už įvertintą [68]. Kai nagrinėjamas antros eilės kompozito modelis, iš homogenizavimo metu apskaičiuotos paslankumo

matricos \mathbf{S} gali būti išreikšiami visi ortotropinei medžiagai apibrėžti taikomi tiesiniai parametrai [69]:

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Dėl matricų \mathbf{S} simetriškumo galioja lygybė $\nu_{xy}E_y = \nu_{yx}E_x$, iš kurios gali būti išreikštas Puasono koeficientas ν_{yx} , jei žinomi E_x , E_y , ν_{xy} įverčiai.

Homogeninės medžiagos tankis ρ_h apskaičiuojamas pagal mišinio formulę:

$$\rho_h = \sum_i \rho_i \alpha_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1; \quad (11)$$

čia ρ_i – i -tosios sudedamosios medžiagos tankis, α_i – i -tosios sudedamosios medžiagos dalis kompozite.

Jei nagrinėjamas kvadratinis a ilgio kraštinės reprezentatyvusis elementas su skritulio skerspjūvio formos gijomis, gijų ir matricos medžiagos dalys α_f ir α_m apskaičiuojamos pagal formules:

$$\alpha_f = \frac{\pi r^2}{a^2}, \quad \alpha_m = 1 - \alpha_f. \quad (12)$$

2.2. Tiesinių tamprumo parametrų įverčiai

2.2.1. Analitiniai įverčiai

Vienkrypčio kompozito ekvivalentūs tiesiniai tamprumo parametrai gali būti vertinami analitinėmis formulėmis, tačiau pagal šias formules apskaičiuotus įverčius rekomenduojama taikyti tik grubiam struktūros elgsenos modeliavimui [19]. Analitinėmis formulėmis Jungo modulio gijų kryptimi ir Puasono koeficiento sluoksnio plokštumoje įverčiai apskaičiuojami pagal tiesioginę mišinio taisyklę (indeksai f ir m nurodo atitinkamai gijų ir matricos medžiagos parametrus) [19]:

$$E_x = \alpha_f E_f + \alpha_m E_m; \quad (13)$$

$$\nu_{xy} = \alpha_f \nu_f + \alpha_m \nu_m. \quad (14)$$

Jei išvedant formules vertinamos dėl šlyties atsiradusios deformacijos, Jungo modulis gijoms statmena kryptimi E_y apskaičiuojamas pagal 15 formulę [20]. Jeigu modelis supaprastinamas ir dėl šlyties atsiradusios deformacijos nevertinamos, E_y apskaičiuojamas pagal 16 formulę [19].

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\alpha_f}{E_f} + \frac{\alpha_m}{E_m} - \frac{\alpha_f \alpha_m (E_f \nu_m - E_m \nu_f)^2}{E_f E_m (E_f \nu_f + E_m \nu_m)}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\alpha_f}{E_f} + \frac{\alpha_m}{E_m}. \quad (16)$$

Šlyties modulis vertinamas pagal formulę [19]:

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{\alpha_f}{G_f} + \frac{\alpha_m}{G_m}. \quad (17)$$

2.2.2. Asimptotinis homogenizavimas

Jei nagrinėjamas kompozito modelis su periodine struktūra, asimptotinis homogenizavimas (ekvivalenčių tiesinių tamprumo parametrų įvertinimas) baigtinių elementų metodu atliekamas su reprezentatyviuoju elementu ir susideda iš dviejų etapų. Pirmame etape sprendžiama lygčių sistema, iš kurios randami charakteringieji poslinkiai χ [38]:

$$\int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \chi = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} dV = \mathbf{F}^D; \quad (18)$$

čia \mathbf{B} – elemento formos funkcijų dalinių išvestinių matrica, \mathbf{D} – tamprumo matrica, V – tūris (plotas dvimačiu atveju). Indeksas e apibrėžia, kad baigtinių elementų metodo lygtys sudaromos atsižvelgiant į kiekvieno elemento geometrines ir mechanines savybes [2]. Ši lygtis atitinka bendrąją konstrukcijos pusiausvyros lygčių pavidalą $\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}$; čia \mathbf{K} – konstrukcijos standumo matrica, \mathbf{U} – poslinkių vektorius, \mathbf{F} – konstrukciją veikiančių jėgų vektorius. Kad sistema turėtų vienintelį sprendinį, vienas (kampinis) mazgas įtvirtinamas visiškai, o kitiems reprezentatyviojo elemento kraštiniam mazgams keliama periodiškumo sąlyga [38].

Dvimačiu (pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio) atveju periodinės sąlygos kvadratiniam reprezentatyviajam elementui, kurio vienas kampinis mazgas yra koordinatinių pradžioje, o kraštinės ilgis lygus a , užrašomos formulėmis:

$$\chi(0, y) = \chi(a, y), \chi(x, 0) = \chi(x, a). \quad (19)$$

Trimačiu (antros eilės vienkrypčio kompozito modelio) atveju periodinės sąlygos kubiniam reprezentatyviajam elementui, kurio kraštinės ilgis a ir vienas kampinis mazgas yra koordinatinių pradžioje, užrašomos išraiškomis [38]:

$$\chi(0, y, z) = \chi(a, y, z), \chi(x, 0, z) = \chi(x, a, z), \chi(x, y, 0) = \chi(x, y, a). \quad (20)$$

Charakteringieji poslinkiai χ yra medžiagos heterogeniškumo matas ir parodo, kaip pakinta nagrinėjamo elemento forma, jei elementas yra veikiamas atitinkamu vektoriumi iš jėgų matricos \mathbf{F}^D [38]. Dvimačiu atveju gaunamos trys reprezentatyviojo elemento formos, apskaičiuojamos pagal matricos \mathbf{F}^D stulpelius. Trimačiu atveju papildomai pridedama sluoksnio storio kryptis (Z) ir gaunamos šešios pagrindinės formos, atitinkančios matricos \mathbf{F}^D stulpelius.

Antrame asimptotinio homogenizavimo etape apskaičiuojama homogeninės medžiagos tamprumo matrica \mathbf{D}^h [38]:

$$\mathbf{D}^h = \sum_{k=1}^n \frac{V_k}{V} \mathbf{D}_k (\mathbf{I} - \mathbf{B}_k \boldsymbol{\chi}_k); \quad (21)$$

čia n – baigtinių elementų skaičius reprezentatyviajame elemente.

Tariama, kad stambioje skalėje homogeninė medžiaga yra ortotropinė, todėl ekvivalentūs tamprumo parametrai nesunkiai išreiškiami iš matricos \mathbf{D}^h atvirkštinės $\mathbf{S} = (\mathbf{D}^h)^{-1}$.

2.2.3. Reprezentatyviojo elemento analizė baigtinių elementų metodu

Tiesinius medžiagos parametrus galima nustatyti remiantis reprezentatyviojo elemento analize baigtinių elementų metodu. Mažoms deformacijoms galioja apibendrintasis Huko dėsnis, tiesiškai siejantis įtempius ir deformacijas [69]:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}; \quad (22)$$

čia $\boldsymbol{\sigma}$ ir $\boldsymbol{\varepsilon}$ – įtempių ir deformacijų vektoriai, užrašomi naudojant Voigt'o notaciją, \mathbf{D} – tamprumo matrica. Sukuriamas toks nepriklausomų deformacijų skaičius, kad iš tiesinių lygčių sistemos būtų galima apskaičiuoti matricą \mathbf{D} , kai žinomos deformacijos ir įtempiai. Deformacijos sukuriamos priskiriant poslinkius reprezentatyviojo elemento kraštinėms sienoms. Kiekvienai deformacijų būsenai (*) neišreikštine baigtinių elementų analize įvertinami ekvivalentūs medžiagos įtempiai skaičiuojant svertinį elementų įtempių vidurkį pagal elemento užimamą tūrio dalį modelyje:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \sum_k \frac{V_k}{V} \boldsymbol{\sigma}_k^*; \quad (23)$$

čia V_k – k -tojo elemento tūris, V – reprezentatyviojo elemento tūris, $\boldsymbol{\sigma}_k^*$ – k -tojo elemento įtempių vektorius Voigt'o notacijoje.

Sudaromos įtempių $\boldsymbol{\sigma}^*$ ir deformacijų $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ matricos, kurių stulpeliuose įrašomi nepriklausomas deformacijas atitinkantys įtempių ($\boldsymbol{\sigma}^*$) ir deformacijų ($\boldsymbol{\varepsilon}^*$) vektoriai.

Deformacijos $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ apskaičiuojamos įvertinant nagrinėjamos srities kampinių mazgų poslinkius pagal formulę [118]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \mathbf{B}\mathbf{u}^*; \quad (24)$$

čia \mathbf{B} – elemento formos funkcijų dalinių išvestinių matrica, apskaičiuota reprezentatyviojo elemento atžvilgiu, \mathbf{u}^* – kampinių reprezentatyviojo elemento mazgų poslinkių vektorius.

Tada ekvivalenčius parametrus patogiau išreikšti iš paslankumo matricos \mathbf{S} , kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$\mathbf{S} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^* \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{*-1}. \quad (25)$$

Jei nagrinėjamos grynosios deformacijos (paprasčiausias nepriklausomų deformacijų atvejis), deformacijų matrica $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ yra diagonalioji. Tokiu atveju pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio analizėje $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ ir $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*$ išraiškos užrašomos formulėmis:

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^I & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^{II} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{xy}^{III} \end{bmatrix}; \quad (26)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^* = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^I & \sigma_{xx}^{II} & \sigma_{xx}^{III} \\ \sigma_{yy}^I & \sigma_{yy}^{II} & \sigma_{yy}^{III} \\ \tau_{xy}^I & \tau_{xy}^{II} & \tau_{xy}^{III} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Grynujų deformacijų atveju antros eilės modeliui $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ ir $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*$ išraiškos užrašomos formulėmis:

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^{II} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz}^{III} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{xy}^{IV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{yz}^V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{zx}^{VI} \end{bmatrix}; \quad (28)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^* = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^I & \sigma_{xx}^{II} & \sigma_{xx}^{III} & \sigma_{xx}^{IV} & \sigma_{xx}^V & \sigma_{xx}^{VI} \\ \sigma_{yy}^I & \sigma_{yy}^{II} & \sigma_{yy}^{III} & \sigma_{yy}^{IV} & \sigma_{yy}^V & \sigma_{yy}^{VI} \\ \sigma_{zz}^I & \sigma_{zz}^{II} & \sigma_{zz}^{III} & \sigma_{zz}^{IV} & \sigma_{zz}^V & \sigma_{zz}^{VI} \\ \tau_{xy}^I & \tau_{xy}^{II} & \tau_{xy}^{III} & \tau_{xy}^{IV} & \tau_{xy}^V & \tau_{xy}^{VI} \\ \tau_{yz}^I & \tau_{yz}^{II} & \tau_{yz}^{III} & \tau_{yz}^{IV} & \tau_{yz}^V & \tau_{yz}^{VI} \\ \tau_{zx}^I & \tau_{zx}^{II} & \tau_{zx}^{III} & \tau_{zx}^{IV} & \tau_{zx}^V & \tau_{zx}^{VI} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

26–29 formulėse viršutinis indeksas nurodo apkrovimo tipą, naudojamą reprezentatyviojo elemento analizei.

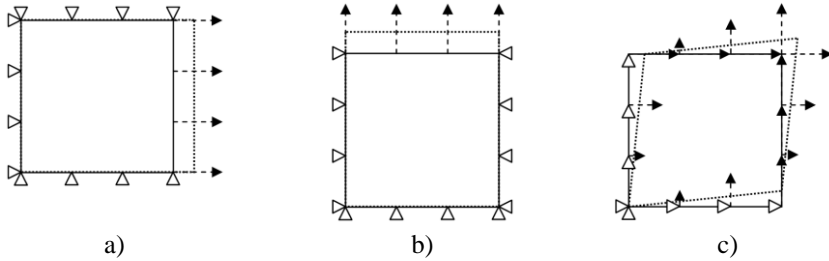
Matricą $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ sudarančios deformacijos įvertinamos pagal kampinius reprezentatyviojo elemento mazgus, tačiau svarbu tinkamai parinkti suteikiamų poslinkių vertes ir kitiems kraštiniams mazgams. Analizuojama reprezentatyvi sritis – pats mažiausias periodinis medžiagos fragmentas, todėl literatūroje deformacijoms keliami periodiškumo sąlyga [6]. Vis dėlto dėl skaidymo neatitikimo priešingose sienose šių sąlygų užtikrinimas gali būti neįmanomas. Todėl kraštinėms sąlygoms keliamas reikalavimas, kad medžiagos tamprumo tenzorius nepriklausytų nuo nagrinėjamo elemento dydžio.

Pirmos eilės vienkrypčio kompozito atveju nagrinėjamos trys grynosios deformacijos – gijų kryptimi, gijoms statmena kryptimi ir šlyties pagal schemas, pavaizduotas 2.4 pav. Schemos periodiniam kvadratiniam elementui, kurio kraštinės ilgis lygus a ir vienas kampas yra koordinačių pradžioje, apibrėžiamos nurodant δ dydžio poslinkius $u(x, y)$ ir $v(x, y)$ atitinkamai X (gijų) ir Y (gijoms statmena) kryptimis:

$$\text{I: } u(0, y) = 0, \quad u(a, y) = \delta, \quad v(x, 0) = v(x, a) = 0; \quad (30)$$

$$\text{II: } u(0, y) = u(a, y) = 0, \quad v(x, 0) = 0, \quad v(a, y) = \delta; \quad (31)$$

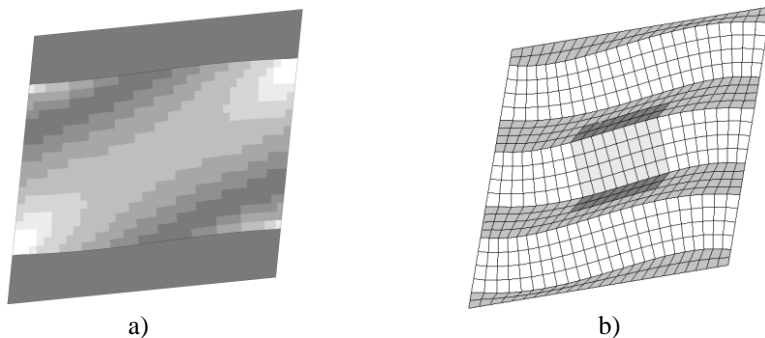
$$\text{III: } \begin{aligned} u(x, 0) = 0, \quad u(x, a) = \delta, \quad u(0, y) = u(a, y) = \delta \frac{y}{a}, \\ v(0, y) = 0, \quad v(a, y) = \delta, \quad v(x, 0) = v(x, a) = \delta \frac{x}{a}. \end{aligned} \quad (32)$$



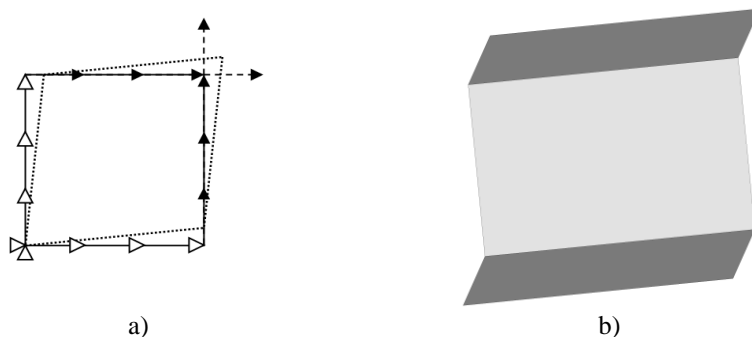
2.4 pav. Apkrovos schemos reprezentatyviajam elementui: (a) I – išilginė tempimo būseną, (b) II – skersinė tempimo būseną, (c) III – šlyties būseną. Tušti trikampiai nurodo įtvirtinimus (simboliai $\triangleright\triangleleft$ reiškia, kad tos kraštinės mazgai įtvirtinti x ašyje, simboliai $\triangle\nabla$ reiškia, kad mazgai įtvirtinti pagal y ašį). Taškinėmis linijomis pateikiama deformuota būseną

Grynoji šlytis sukuriama, jei visos nagrinėjamo elemento kraštinės lieka tiesios deformuotoje būsenoje [16]. Tačiau dėl reikšmingo medžiagų mechaninių savybių skirtumo medžiagų sandūroje susidaro įtempių koncentracijos (2.5 pav., a), ir apskaičiuoti šlyties modulio įverčiai priklauso nuo nagrinėjamos srities dydžio. Tam, kad būtų sumažinta kraštuose susidarančių įtempių koncentracijų įtaka, reprezentatyvusis elementas įterpiamas į deformuojamą aplinkinę sritį (2.5 pav., b), o įtempiai ir deformacijos skaičiuojamos tik centre esančiam periodiniam elementui. Kai reprezentatyvųjį elementą supanti juosta pakankamai plati, gijos pradeda banguoti. Taip gaunama būseną, kai srities platinimas nebeturi įtakos pagal vidurinį elementą apskaičiuotiems parametrams, nes šio elemento kraštinės, turinčios kelių medžiagų elementus, nėra ribojamos tiesių kraštinių sąlygų. Todėl šių sąlygų atsisakoma ir, nagrinėjant vieną periodinį elementą, pagal 2.6 pav., a) deformuoto elemento formą 2.6 pav., b) artėja į elemento, apsupto begaline sritimi, formą. Supaprastintos kraštinės sąlygos šlyties deformacijai užrašomos ryšiais:

$$\text{III: } \begin{aligned} u(x, 0) = 0, \quad u(x, a) = \delta, \quad v(0, y) = 0, \quad v(a, y) = \delta. \end{aligned} \quad (33)$$



2.5 pav. (a) Reprerzentatyviojo elemento von Mises įtempiai, kai užtikrinama tiesių kraštinių sąlyga ir (b) pagal tą pačią schemą deformuojama didesnė sritis, kai reprezentatyvusis elementas sluoksnyje supamas vieno aplinkinės srities elemento



2.6 pav. (a) Pakeista (laisvų kraštų) šlyties apkrovos schema (IV) ir (b) pagal ją deformuoto elemento von Mises įtempiai

Antros eilės vienkrypčio kompozito modelio kubiniam reprezentatyviajam elementui, kurio kraštinės ilgis a ir vienas kampas yra koordinatinių sistemų pradžioje, o gijų kryptis sutampa su X ašimi, sukuriamos šešios grynosios deformacijos: gijų kryptimi, gijoms statmenomis kryptimis (sluoksnyje ir sluoksnio storio), šlyties trijose plokštumose pagal schemas, pavaizduotas 2.7 pav. Kaip pirmos eilės modelio atveju, grynosios deformacijos tokiam elementui sukuriamos, jeigu šlyties deformacijų metu elemento sienos lieka tiesios. Deformacijos sudaromos nurodant δ dydžio poslinkius $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $\omega(x, y, z)$ atitinkamai X (gijų), Y ir Z kryptimis:

$$\text{I: } \begin{aligned} u(a, y, z) = \delta, \quad u(0, y, z) = 0, \\ v(x, 0, z) = v(x, a, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = 0; \end{aligned} \quad (34)$$

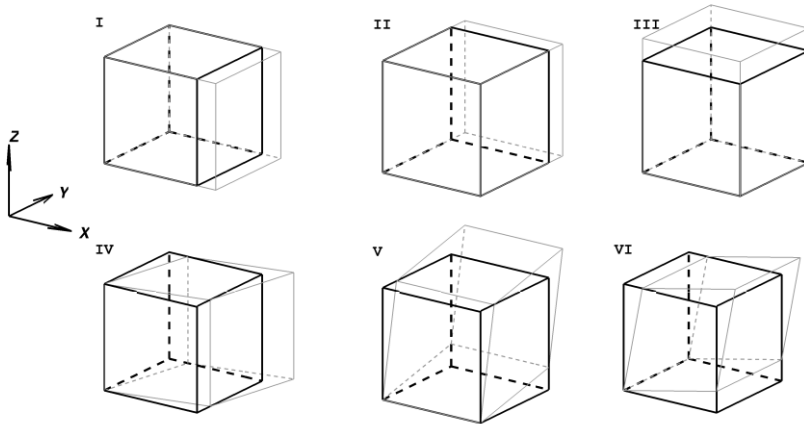
$$\text{II: } \begin{aligned} u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, a, z) = \delta, \\ v(x, 0, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = 0; \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{III: } \begin{aligned} u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, a, z) = 0, \\ \omega(x, y, a) = \delta, \quad \omega(x, y, 0) = 0; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
 \text{IV: } & u(x, 0, z) = 0, \quad u(x, a, z) = \delta, \quad u(0, y, z) = u(a, y, z) = \frac{y\delta}{a}, \\
 & v(a, y, z) = \delta, \quad v(0, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, a, z) = \frac{x\delta}{a}, \quad (37) \\
 & \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{V: } & u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \\
 & v(x, y, c) = \delta, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, a, z) = \frac{z\delta}{a}, \quad (38) \\
 & \omega(x, a, z) = \delta, \quad \omega(x, 0, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = \frac{y\delta}{a};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{VI: } & u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \\
 & v(x, y, a) = \delta, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, a, z) = \frac{z\delta}{a}, \quad (39) \\
 & \omega(x, a, z) = \delta, \quad \omega(x, 0, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = \frac{y\delta}{a};
 \end{aligned}$$



2.7 pav. Apkrovos schemas reprezentatyviajam elementui: I – išilginė tempimo būseną, II, III – skersinės tempimo būsenos, IV, V, VI – šlyties XY , YZ , ZX būsenos. Pilkomis linijomis pateikiama deformuota būseną

Tačiau pagal kraštinės sąlygas 34–39 apskaičiuoti tiesiniai parametrai priklauso nuo nagrinėjamos srities dydžio dėl susidarančių įtempių koncentracijų (2.8 pav., a). Siekiant sumažinti kraštinių elementų įtaką ekvivalenčių parametru įverčiui, reprezentatyvusis elementas gali būti įterpiamas kubo formos aplinkos, veikiamos pagal kraštinės sąlygas 34–39, centre (2.8 pav., b). Tada reprezentatyviojo elemento sienos neišlieka plokščios ir elemento įgyjama forma didinant aplinkinės srities plotį artėja prie formos, kai sudarant šlyties deformacijas sienoms leidžiama judėti laisvai kita nei tą pačią ar priešingą sieną veikiančia kryptimi. Tokiu atveju skaičiavimų schemoje šlyties deformacijas nurodančios kraštinės sąlygos keičiamos formulėmis (išlaikomas reikalavimas, kad reprezentatyviojo elemento kampiniai mazgai sudarytų grynąsias deformacijas):

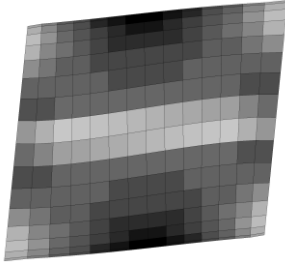
$$\begin{aligned}
 \text{IV: } & u(x, a, z) = \delta, \quad u(x, 0, z) = 0, \quad v(a, y, z) = \delta, \\
 & v(0, y, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, a) = 0; \quad (40)
 \end{aligned}$$

$$\text{V: } u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, y, a) = \delta, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad (41)$$

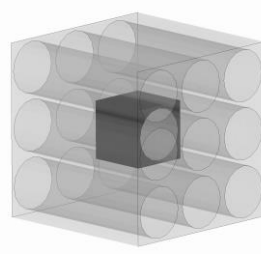
$$\omega(x, a, z) = \delta, \quad \omega(x, 0, z) = 0;$$

$$\text{VI: } u(x, y, a) = \delta, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, a, z) = 0, \quad (42)$$

$$\omega(a, y, z) = \delta, \quad \omega(0, y, z) = 0.$$



a)



b)

2.8 pav. (a) Reprerzentatyviojo elemento gijų von Mises įtempiai, kai šlyties XY deformacijos schemoje užtikrinama tiesių kraštinių sąlyga ir (b) pagal tą pačią schemą deformuojama didesnė sritis, kai reprezentatyvusis elementas supamas vieno aplinkinės srities elemento

2.3. Netiesinių tamprumo parametrų nustatymas

Stambiausios skalės modelyje taikomų kevalo elemento medžiagos modelio savybių susilpnėjimas apibrėžiamas Hashin kriterijumi. Šiuo kriterijumi išskiriamos išilginio (gijų tempimo bei gniuždymo) ir skersinio (matricos tempimo bei gniuždymo) susilpnėjimo būsenos [123].

- Gijų tempimo ir gniuždymo:

$$\left(\frac{\sigma_x}{XX}\right)^2 - 1 = \begin{cases} \geq 0, & \text{susilpnėjęs;} \\ < 0, & \text{stiprus} \end{cases}; \quad (43)$$

čia $XX = \begin{cases} XT, & \text{jei } \sigma_x \geq 0 \\ XC, & \text{jei } \sigma_x < 0 \end{cases}$, XT , XC – išilginio stiprumo tempiant ir gniuždant (maksimalių įtempių) vertės.

- Matricos tempimo ir gniuždymo:

$$\left(\frac{\sigma_y}{YY}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{SC}\right)^2 - 1 = \begin{cases} \geq 0, & \text{susilpnėjęs;} \\ < 0, & \text{stiprus} \end{cases}; \quad (44)$$

čia $YY = \begin{cases} YT, & \text{jei } \sigma_y \geq 0 \\ YC, & \text{jei } \sigma_y < 0 \end{cases}$, YT , YC – skersinio stiprumo tempiant ir gniuždant (maksimalių įtempių) vertės, SC – šlyties stiprumas.

Stambiausios skalės medžiagos modelio netiesiniam įtempių–deformacijų ryšiu apibrėžti smulkiausioje skalėje reikia nustatyti ašines bei šlyties stiprumo ribas XT , YT , SC ir deformacijas, kuriose stiprumas yra pasiekiamas ϵ_{XT} , ϵ_{YT} , γ_{SC} .

Jei gijų medžiagos modelis tiesinis iki suirimo ir $\bar{\epsilon}_f$ yra maksimali galima gijų medžiagos deformacija (paprastai kur kas mažesnė nei maksimali galima matricos medžiagos deformacija $\bar{\epsilon}_m$), α_f , α_m – gijų ir matricos medžiagos dalys modelyje, E_f ,

E_m – gijų ir matricos medžiagos Jungo moduliai, gali būti taikomas analitinis tempimo gijų kryptimi stiprumo XT įvertis [20]:

$$XT = (E_f \alpha_f + E_m \alpha_m) \bar{\epsilon}_f. \quad (45)$$

Kompozito stiprumo YT gijoms statmena kryptimi įverčiui taikomi maksimalūs matricos medžiagos įtempiai [20]:

$$YT = \bar{\sigma}_m. \quad (46)$$

Šlyties stiprumui analitiniai įverčiai netaikomi, nes įtempių–deformacijų ryšys yra netiesinis. Be to, YT ir SC reikšmės priklauso nuo deformacijų greičio [124].

Medžiagos stiprumo parametrą įvertinti taikoma reprezentatyviojo elemento baigtinių elementų metodo išreikštinė analizė. Reprezentatyviajam elementui sukuriama grynosios deformacijos gijų ir gijoms statmena (sluoksnyje) kryptimi, šlyties sluoksnyje deformacija (taikomos kraštinės sąlygos, aprašomos formulėmis 34, 35, 40). Poslinkiai didinami tiesiškai tokį laikotarpį, kad būtų užtikrintas gijų arba matricos medžiagos suirimas. Poslinkių kitimo greitis parenkamas toks, kad dvigubai mažesniu greičiu tempiamas elementas pasiektų artimas (skirtumas mažesnis nei 10 %) stiprumo vertes. Stiprumo vertės gaunamos iš tikrųjų įtempių – tikrųjų (Hencky) deformacijų kreivių. Nagrinėjamu laiko momentu deformacijos skaičiuojamos reprezentatyviojo elemento kampiniams mazgams. Tikrųjų deformacijų tenzorius apibrėžiamas formule [16, 28]:

$$\boldsymbol{\epsilon}^H = \frac{1}{2} \ln(\mathbf{I} + 2\boldsymbol{\epsilon}^G) = \frac{1}{2} \ln(\mathbf{F}_e^T \mathbf{F}_e); \quad (47)$$

čia \mathbf{I} – vienetinė marica, $\boldsymbol{\epsilon}^G$ – Green'o deformacijų tenzorius, \mathbf{F}_e – deformacijų gradiento tenzorius, turintis formą \mathbf{F}_1 pirmos eilės modeliui ir \mathbf{F}_2 antros eilės modeliui [118]:

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} & \frac{\partial \omega}{\partial y} & 1 + \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix}; \quad (48)$$

čia u, v, ω – poslinkiai X, Y ir Z kryptimis.

Medžiagos stiprumo įverčiai XT, YT ir SC nustatomi remiantis maksimalių įtempių kriterijumi. Stiprumo parametrų vertės yra didžiausios reprezentatyviojo elemento ekvivalentių įtempių reikšmės pagal atitinkamą apkrovos schemą laiko momentu prieš gijų ar matricos medžiagos suirimą:

$$XT = \max_t(\sigma_x^{[t]}), \epsilon_{XT} = \epsilon_x^{[t']}, t': \sigma_x^{[t']} = XT; \quad (49)$$

$$YT = \max_t(\sigma_y^{[t]}), \epsilon_{YT} = \epsilon_y^{[t']}, t': \sigma_y^{[t']} = YT; \quad (50)$$

$$SC = \max_t(\tau_{xy}^{[t]}), \gamma_{SC} = \gamma_{xy}^{[t']}, t': \tau_{xy}^{[t']} = SC. \quad (51)$$

Taigi rinkiniai (ε_{XT}, XT) , (ε_{YT}, YT) nusako tempimo įtempių–deformacijų kreivių taškus, kuriuose tikimasi medžiagos susilpnėjimo atitinkama kryptimi [16]. Analogiškai pora (γ_{SC}, SC) nurodo šlyties įtempių–deformacijų kreivės tašką, kuriame tikimasi šlyties įtempių sumažėjimo. Kai pasiekiamas stiprumo taškas, atitinkami įtempiai sumažinami iki nustatytos reikšmės, bet elementas išlaiko savo stiprumą kitomis kryptimis. Pavyzdžiui, jei elementas pasiekia savo stiprumą gijų kryptimi, išilginiai įtempiai sumažinami, bet elemento medžiagos savybės išlieka gijoms statmena kryptimi ir nagrinėjant šlytį. Tokia elemento elgsena nesutampa su antros eilės vienkrypčio kompozito tūrinio modelio elgsena, kada reprezentatyvusis elementas visiškai suyra, jei suyra gijos. Be to, nors ir buvo pasiektas medžiagos susilpnėjimo kriterijus visoms būsenoms, kevalo elementas lieka makromodelyje, jei nebuvo pasiekta ištrynimo deformacija. Pavėluotas kevalo elemento ištrynimas iš struktūros padidina modelio standumą kontakto uždaviniuose.

Jei nagrinėjamas pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelis, stiprumo verčių XT ir YT nustatymui reprezentatyviojo elemento kraštinės poslinkiai didinami pagal schemas, pavaizduotas 2.4 pav., a), b). Šlyties stiprumui SC nustatyti schemas 2.4 pav., c) ir 2.6 pav., a) tiesiogiai negali būti taikomos, nes neužtikrinamos tolygios kraštinės sąlygos, kai matricos medžiaga patiria plastines deformacijas. Todėl pagal 2.6 pav., a) schemą deformuojama struktūra, kurią sudaro reprezentatyvusis elementas, įterptas aplinkoje su kur kas didesnėmis nutrūkimo deformacijomis. Aplinkos plotis – vienas reprezentatyvusis elementas. Šiuo atveju visai struktūrai nebekeliama tiesių kraštinių sąlyga, todėl pakanka siauros aplinkinės srities, kuri užtikrina, kad būtų gaunami duomenys apie mazgus net ir po to, kai ištrinami reprezentatyviai sričiai priklausantys elementai. SC įvertis apskaičiuojamas kaip ekvivalentūs šlyties įtempiai prieš matricos medžiagos suirimą.

Kaip ir pirmos eilės modeliui, iš antros eilės vienkrypčio kompozito modelio reprezentatyviojo elemento, laipsniškai deformuojamo pagal 2.7 pav. I ir II schemas, analizės gaunamos vertės XT , YT . Analogiškai, šlyties įtempių–deformacijų kreivė brėžiama iš vieno reprezentatyviojo elemento, XY plokštumoje apsupto vieno elemento pločio aplinkos su didesnėmis suirimo deformacijomis, analizės, kai aplinkos kraštinės veikiamos pagal 2.7 pav. IV schemą be tiesių kraštinių sienų sąlygos.

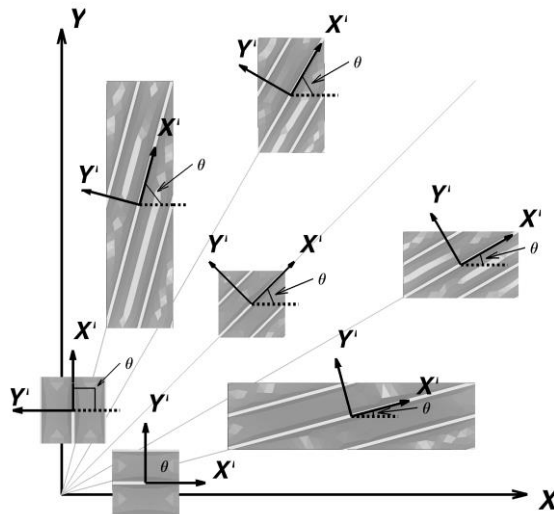
2.4. Suirimo kriterijaus nustatymas (efektyviosios suirimo deformacijos (ESD) parinkimas) antros eilės vienkrypčio kompozito modeliui

Elemento ištrynimas iš struktūros turi didelę įtaką jos standumui. Pavėluotas elemento ištrynimas gali padidinti struktūros standumą, o per anksti ištrintas elementas struktūrą gali susilpninti. Tai ypač svarbu kontakto uždaviniuose, kai nagrinėjama kelių objektų sąveika ar greičių kitimas.

Stambios skalės modelyje, sudarytame iš kevalo elementų, elementas ištrinamas, jei efektyvioji deformacija pasiekia parinktą maksimalią efektyviają deformaciją (ESD). Efektyvioji deformacija skaičiuojama kaip išilginės, skersinės ir šlyties deformacijų medžiagos koordinatinių sistemoje kombinacija [125]:

$$ES = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{3 \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \gamma_{xy}^2}. \quad (52)$$

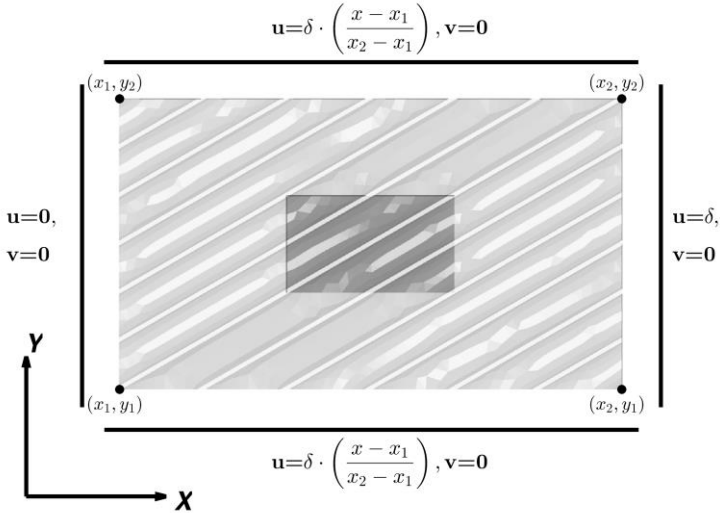
Tariama, kad vienkryptis kompozitas yra visiškai suiręs (homogeninės medžiagos elementas gali būti ištrintas), jei nutrūksta gijos. Tai leidžia daryti prielaidą, kad ESD parametras turėtų būti lygus deformacijos vertei ε_{XT} , atitinkančiai išilginį stiprumą. Tačiau tokia vertė gerokai susilpnina modelį, jei nagrinėjama ne išilginė apkrova, nes elementas nespėja pasiekti savo stiprumo kitomis kryptimis. Antra vertus, gijos nenutrūksta, jei medžiaga tempiama gijoms statmena kryptimi. Remiantis gijų nutrūkimo kriterijumi, ESD vertė, apskaičiuota pagal tokį modelį, lygi begalybei. Tokiu atveju struktūros standumas yra pervertinamas, elementai patiria dideles deformacijas ir tampa netaisyklingos formos (elemento mazgai nėra vienoje plokštumoje, vienos elemento kraštinės kur kas ilgesnės už kitas ir pan.). Dėl netaisyklingos formos elementų gerokai sumažinamas išreikštinės analizės žingsnis, pailgėja skaičiavimų laikas, todėl toks ESD parinkimas nėra tinkamas.



2.9 pav. Analizuoti reprezentatyviųjų elementų modeliai ESD nustatymui globaliojoje koordinatinių sistemoje (X–Y–Z) su pasukta medžiagos koordinatinių sistema (X'–Y'–Z), kai reprezentatyviojo elemento kraštinės lygiagrečios globaliosios koordinatinių sistemos ašims

Kad būtų sumažintas ESD prisitaikymas prie nustatymui taikomų apkrovos sąlygų, šis parametras apskaičiuojamas iš deformacijų gijų suirimo metu, kai medžiagos koordinatinių sistemoje elementas patiria įvairių tipų deformacijas. Nagrinėjami reprezentatyvieji elementai, išskirti iš medžiagos, pasuktos kampu θ ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) (2.9 pav.), o elemento kraštinės lygiagrečios su globaliosios koordinatinių sistemos ašimis. Reprezentatyvieji elementai išlaiko periodiškumą ir jais įvertinama pasuktos medžiagos heterogeninė struktūra, tačiau jų kraštinės nėra vienodo ilgio. Nagrinėjamai struktūrai sukuriama tiesiškai

didėjantys poslinkiai globaliosios X ašies kryptimi. Jeigu analizei taikomos kraštinės sąlygos siekiant nustatyti kompozito stiprumą gijų kryptimi (34), priešingos šoninės kraštinės įgyja nevienodus poslinkius ir įtempiai koncentruojasi elemento įstrižainėje. Kad analizuojama sritis būtų veikiamą tolygiai, reprezentatyvusis elementas patalpinamas į aplinką su kur kas didesnėmis suirimo deformacijomis. Be to, tempimo bendromis X ir Y kryptimis schemas pakeičiamos taip, kad poslinkiai būtų suteikiami ne tik kraštinei sienai, pagal kurią tempiama, bet ir šoninėms sienoms (2.10 pav.).



2.10 pav. Kraštinės sąlygos x apkrovai

Tariama, kad reprezentatyviojo elemento dydis ir jį supančios aplinkos plotis yra pakankamas, o baigtinių elementų modelio skaidymas yra tinkamas, jei reprezentatyviajam elementui apskaičiuotas ir į medžiagos koordinačių sistemą pasuktas tamprumo tenzorius \mathbf{D}^θ skiriasi nuo tamprumo tenzorius \mathbf{D} , apskaičiuoto iš vieno nepasukto reprezentatyviojo elemento, ne daugiau nei norimu tikslumu ϵ . Neatitikimas R tarp tenzorių vertinamas normuotos vidutinės kvadratinės paklaidos prasme ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\mathbf{D}_{i,j} - \mathbf{D}_{i,j}^\theta)^2}}{n \cdot \max_{i,j} \mathbf{D}_{i,j}}; \quad (53)$$

čia n – tenzorius eilučių (stulpelių) skaičius.

Pasuktos medžiagos tamprumo tenzoriui globaliojoje koordinačių sistemoje \mathbf{D}_G nustatyti taikomos kraštinės sąlygos, kai poslinkiai suteikiami ne tik tempiamai kraštinei sienai, bet ir šoninėms sienoms taip išvengiant įtempių koncentracijos elemento įstrižainėje, o sudarant šlyties deformacijas išlaikoma tiesių kraštų sąlyga.

Kraštinės sąlygos pirmos eilės stačiakampiam modeliui, kurio kraštinių ilgiai a ir b , užrašomos formulėmis:

$$\text{I: } u(a, y) = \delta, \quad u(0, y) = 0, \quad u(x, 0) = u(x, b) = \frac{x\delta}{a}, \quad (54)$$

$$v(0, y) = v(a, y) = 0, \quad v(x, 0) = v(x, b) = 0;$$

$$\text{II: } u(x, 0) = u(x, b) = 0, \quad u(0, y) = u(a, y) = 0, \quad (55)$$

$$v(x, b) = \delta, \quad v(x, 0) = 0, \quad v(0, y) = v(a, y) = \frac{y\delta}{b};$$

$$\text{III: } u(x, 0) = 0, \quad u(x, b) = \delta, \quad u(0, y) = u(a, y) = \frac{y\delta}{b}, \quad (56)$$

$$v(a, y) = \delta, \quad v(0, y) = 0, \quad v(x, 0) = v(x, b) = \frac{x\delta}{a}.$$

Kraštinės sąlygos antros eilės stačiakampio gretasienio formos modeliui su kraštinėmis a, b, c užrašomos formulėmis:

$$\text{I: } u(a, y, z) = \delta, \quad u(0, y, z) = 0, \quad u(x, 0, z) = u(x, b, z) = \frac{x\delta}{a}, \quad (57)$$

$$v(0, y, z) = v(a, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0,$$

$$\omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0;$$

$$\text{II: } u(x, 0, z) = u(x, b, z) = 0, \quad u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad (58)$$

$$v(x, b, z) = \delta, \quad v(x, 0, z) = 0, \quad v(0, y, z) = v(a, y, z) = \frac{y\delta}{b},$$

$$\omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0;$$

$$\text{III: } u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0, \quad (59)$$

$$\omega(x, y, z) = \delta, \quad \omega(x, y, 0) = 0;$$

$$\text{IV: } u(x, 0, z) = 0, \quad u(x, b, z) = \delta, \quad u(0, y, z) = u(a, y, z) = \frac{y\delta}{b}, \quad (60)$$

$$v(a, y, z) = \delta, \quad v(0, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = \frac{x\delta}{a},$$

$$\omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0;$$

$$\text{V: } u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad (61)$$

$$v(x, y, c) = \delta, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = \frac{z\delta}{c},$$

$$\omega(x, b, z) = \delta, \quad \omega(x, 0, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = \frac{y\delta}{b};$$

$$\text{VI: } u(x, y, c) = \delta, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad u(0, y, z) = u(a, y, z) = \frac{z\delta}{c}, \quad (62)$$

$$v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0,$$

$$v(a, y, z) = \delta, \quad \omega(0, y, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = \frac{x\delta}{a}.$$

Vidutiniai įtempiai skaičiuojami tik reprezentatyviajam elementui (suyrančiai sričiai), o deformacijos įvertinamos pagal šios srities kampinius mazgus. Taupant skaičiavimų resursus aplinkinės srities, kuri sušvelnina kraštinių sąlygų poveikį, skaidymas gali būti kur kas grubesnis nei vidurinės srities, pagal kurios elementus apskaičiuojamas tenzorius. Iš suformuotų deformacijų ir įtempių matricų, kurių stulpeliuose įrašyti kraštinės sąlygas atitinkantys įtempiai ir deformacijos, išreiškiamas medžiagos tamprumo tenzorius \mathbf{D}_G globaliojoje koordinatinių sistemoje.

Dėl skaičiavimo paklaidų ir deformacijoms skaičiuoti naudojamų tiesių srities kraštinių prielaidos (deformacijos skaičiuojamos pagal kampinius vidurinės srities mazgus) atsiradusio tamprumo tenzoriaus nesimetriškumo nagrinėjamos srities tinkamumui vertinti naudojama globaliosios koordinačių sistemos tamprumo tenzoriaus \mathbf{D}_G simetrinė dalis:

$$\mathbf{D}_S = \frac{\mathbf{D}_G^T + \mathbf{D}_G}{2}. \quad (63)$$

Globalioji (X, Y, Z) ir medžiagos (X', Y', Z') koordinačių sistemos siejamos krypties kosinusų matrica $\mathbf{\Lambda}$. Medžiagos koordinačių sistemos (X', Y', Z') ir globaliosios koordinačių sistemos (X, Y, Z) sluoksnio plokštumai statmenos ašys Z' ir Z sutampa, todėl transformacijos atliekamos XY plokštumoje, o krypties kosinusų matricos forma:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (64)$$

čia (l_i, m_i, n_i) – i -tosios ašies ($i = 1, 2, 3$ atitinka X', Y', Z') vienetinis medžiagos koordinačių sistemos vektorius globaliojoje koordinačių sistemoje.

Simetrizuotas tamprumo tenzorius \mathbf{D}_S iš globaliosios koordinačių sistemos transformuojamas į medžiagos koordinačių sistemą naudojant transformacijos matricą \mathbf{T} [69]:

$$\mathbf{D}^\theta = \mathbf{T} \mathbf{D}_S \mathbf{T}^T; \quad (65)$$

čia \mathbf{D}^θ – tamprumo tenzorius medžiagos koordinačių sistemoje, \mathbf{T} – transformacijos matrica, apskaičiuojama naudojant krypties kosinusų matricos elementus, kurios forma \mathbf{T}_1 pirmos eilės modeliui ir \mathbf{T}_2 antros eilės modeliui [69]:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & 2l_2m_2 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & l_1m_2 + m_1l_2 \end{bmatrix}; \quad (66)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2m_1n_1 & 2l_1n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2l_2n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2l_3n_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2 + m_1l_2 & m_1n_2 + n_1m_2 & l_1n_2 + n_1l_2 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + m_2l_3 & m_2n_3 + n_2m_3 & l_2n_3 + n_2l_3 \\ l_1l_3 & m_1m_3 & n_1n_3 & l_1m_3 + m_1l_3 & m_1n_3 + n_1m_3 & l_1n_3 + n_1l_3 \end{bmatrix}. \quad (67)$$

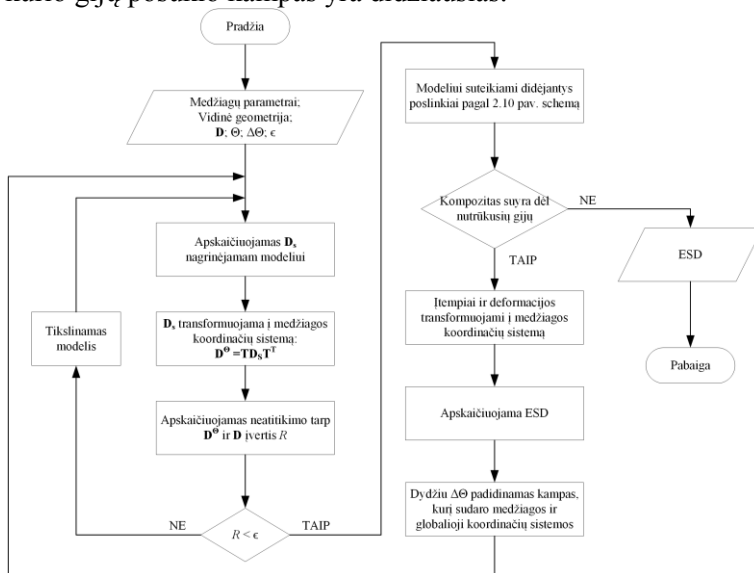
Kiekvienam nagrinėjamam gijų posūkio kampui parenkamas nurodytas sąlygas atitinkantis baigtinių elementų modelis, su kuriuo atliekama išreikštinė analizė pagal 2.10 pav. schemą (54 ir 57 formules atitinkamai pirmos ir antros eilės modeliams) tiesiškai didinant poslinkius δ . Aplinkinės srities suirimo deformacijos yra kur kas didesnės nei reprezentatyviojo elemento, todėl elementų suirimas stebimas nagrinėjamos zonos viduryje. Vidutinių įtempių–deformacijų (apskaičiuojamų pagal vidurinės srities kampinius mazgus) ryšiai vertinami globaliojoje koordinačių

sistemoje. Parametras ESD vertinamas medžiagos koordinatinių sistemoje, todėl globaliojoje koordinatinių sistemoje (X, Y, Z) apskaičiuotos įtampių ir deformacijų vertės transformuojamos į medžiagos koordinatinių sistemą (X', Y', Z') atliekant standartinę transformaciją [118]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} & \tau_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix} = \mathbf{\Lambda} \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \mathbf{\Lambda}^T. \quad (68)$$

Maksimalios efektyviosios deformacijos įvertis ESD kiekvienam modeliui su skirtingu pasukimo kampų skaičiuojamas laiko momentu prieš nutrūkstam gijoms. 90° kampu pasuktų gijų modeliui tokio tipo nutrūkimas nėra pasiekiamas. Todėl poveikio modeliui su ESD reikšme, įvertinta pagal 90° kampu pasuktą reprezentatyvųjį elementą, skaitiniuose eksperimentuose taikoma kur kas didesnė reikšmė nei nagrinėjant kitus modelius. Pagal suirimo tipą modeliai gali būti skirstomi į valdomus gijų (reprezentatyvios srities elementai suyra, nes pasiekiamas maksimali arba artima jai įtampių riba gijų kryptimi) arba valdomus matricos (pasiekiamas maksimali arba artima jai įtampių riba gijoms statmena kryptimi). Pagal antrojo tipo modelius apskaičiuotos ESD deformacijos įgyja kur kas didesnes vertes nei apskaičiuotos pagal pirmo tipo modelius, nes suirusi matricos medžiaga leidžia gijoms judėti laisvai.

Makroskalės skaičiavimams rekomenduojama taikyti didžiausią ESD vertę, gaunamą pirmo tipo modeliams, kai elemento suirimas vyksta dėl nutrūkusių gijų. Dėl didelių matricos medžiagos nutrūkimo deformacijų tokia vertė gaunama pirmo tipo modeliui, kurio gijų posūkių kampas yra didžiausias.



2.11 pav. Efektyviosios suirimo deformacijos parinkimo schema

ESD vertės parinkimo schema (2.11 pav.) susideda iš dviejų pagrindinių etapų – modelio (analizuojamos reprezentatyvios srities dydžio, aplinkinės srities pločio, skaidymo tankumo) parinkimo ir jo analizės. Pradedant skaičiavimus turi būti žinoma

nagrinėjamo kompozito vidinė geometrija; sudedamųjų medžiagų parametrai; ekvivalentus tamprumo tenzorius \mathbf{D} , apskaičiuotas iš vieno nepasukto reprezentatyviojo elemento; pradinis kampas θ , kurį sudaro medžiagos ir globalioji koordinatinių sistema; žingsnis $\Delta\theta$, kuriuo keičiamas kampas; pasirinkta tikslumo vertė ϵ , naudojama tenzorių \mathbf{D}^θ ir \mathbf{D} panašumui įvertinti. Keliamas reikalavimas, kad pradinė ESD vertė būtų žinoma iš anksto, arba medžiagos fragmento analizė turi prasidėti nuo tokio medžiagos pasukimo kampo, kai kompozito elgseną valdo gijos – pirmuoju žingsniu tikrai bus apskaičiuota ESD vertė (siūloma pradinė θ reikšmė 0°).

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurtas dviejų pakopų skaitinis modelis vienkrypčio kompozito dinaminei analizei. Pagal modelį smulkiausioje skalėje galima nustatyti vienkrypčio kompozito ekvivalentinius tamprumo parametrus ir netiesinius bei suirimo parametrus, kurie gali būti taikomi stambios skalės modeliui.
2. Tiesiniai tamprumo parametrai gali būti nustatomi pagal apibendrintąjį Huko dėsnį baigtinių elementų metodu reprezentatyviajam elementui sukuriant modelio eilę atitinkantį skaičių nepriklausomų deformacijų. Deformacijoms suteikiamos kraštinės sąlygos, kuriomis užtikrinama elemento elgsena, artima elemento, apsupto plačios aplinkinės srities, kuriai sukuriama grynosios deformacijos, elgsenai.
3. Kompozicinės medžiagos didžiausios pasiekiamos įtempių reikšmės nustatomos sukuriant vis didėjančias reprezentatyviojo elemento deformacijas pagal schemas, taikomas tiesiniams parametrui nustatyti. Suirimo ribos taškai deformacijų ir įtempių kreivėse vertinami maksimalių įtempių kriterijumi. Vertinant šlyties stiprumą tam, kad būtų užtikrinamos tolygios kraštinės sąlygos, reprezentatyvusis elementas apsupamas vieno elemento pločio aplinkos, kurioje medžiagos suirimo deformacijos gerokai didesnės nei vidinėje srityje.
4. Elemento maksimalią efektyviąją deformaciją siūloma vertinti pagal neašinio bandymo skaitinių eksperimentų rezultatus. Tokio bandymo metu įvairiais kampais pasuktoms medžiagos struktūroms įvertinama kelių tipų deformacijų kombinacija. Stambios skalės modeliui siūloma taikyti didžiausią efektyviosios deformacijos įvertį, gautą modeliams, kurių gijų medžiaga suyra anksčiau nei matricos medžiaga.

3. SKAITINIAI EKSPERIMENTAI

3.1. Dviskalis modelis

Skaitiniais eksperimentais siekiama patikrinti, ar homogeninės medžiagos modelio su tiesiniais, netiesiniais ir suirimo parametrais, nustatytais pagal 2 skyriuje pateiktą metodiką, elgsena atitinka atskaitos modelio elgseną. Atskaitos modeliu įvertinama vienkrypčio kompozito vidinė sandara, sudedamųjų medžiagų parametrai. Taria, kad skaičiavimų rezultatai, gauti atskaitos modeliui, yra teisingi.

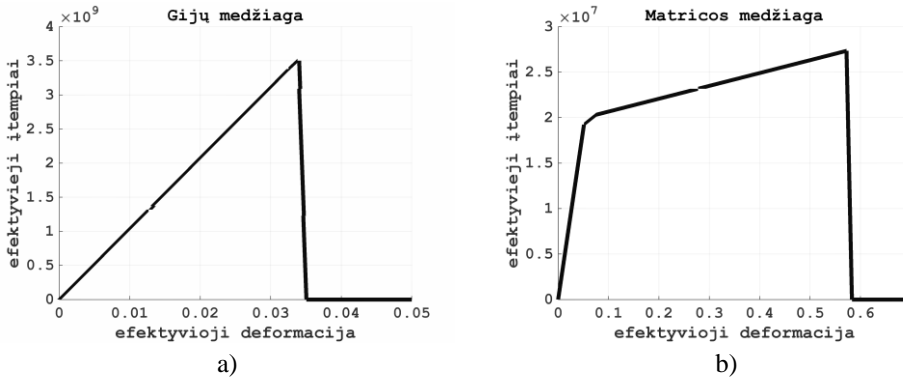
Skaičiavimai atliekami kompozitui, sudarytam iš ilgų aramidų gijų, viena kryptimi (lygiagrečiai) įterptų mažo tankio polietileno matricoje. Aramido gijos plačiau naudojamos kaip kompozito stiprinamoji medžiaga dėl medžiagos standumo ir stiprumo, mažo tankio, atsparumo aukštai temperatūrai ir kitų savybių.

Sudaromas dviejų skalių modelis. Smulkiroje skalėje analizuojama vienkrypčio kompozito reprezentatyvi sritis. Nagrinėjami pirmos ir antros eilės vienkrypčio kompozito modeliai, kurių struktūra yra periodinė, ideali (gijos lygiagrečios, perėjimas tarp gijų ir matricos medžiagos idealus, nėra defektų, trūkumų). Be to, žinomi visi duomenys apie sudedamąsias medžiagas (tiesiniai tamprumo parametrai, plastinė elgsena, suirimo ribos, tankiai). Šioje skalėje pagal 2 skyriuje pateiktą metodiką įvertinami ekvivalentūs tiesiniai tamprumo parametrai, suirimo ribos ir maksimali efektyvioji deformacija. Netiesinių modelio parametrų tinkamumas vertinamas stambioje skalėje atliekamais skaitiniais plokštelės ašinio tempimo testais, kurių rezultatai lyginami su atitinkamo atskaitos modelio rezultatais. Atskaitos modelio eilė atitinka reprezentatyviojo elemento, naudoto ekvivalentiems parametrams nustatyti smulkiroje skalėje, eilę. Stambioje skalėje apskaičiuojamas vidutiniu greičiu judančios absoliučiai kietos sferos kontaktas su viena, dviem, keturiomis ir aštuoniomis sukryžiuotomis kompozito plokštelėmis. Lyginamas sferos greičių kitimas, kai sfera veikia homogeninės medžiagos kompozito modelį ir kai sfera veikia tokio paties dydžio plokštelę, sudarytą pagal pirmos eilės kompozito modelį. Homogeninės medžiagos modeliui taikomi smulkiroje skalėje įvertinti parametrai.

Taria, kad smulkiroje skalėje reprezentatyvųjį elementą sudarančios medžiagos yra izotropinės su parametrais, pateiktais 3.1 lentelėje. Aramido gijų medžiagos įtempimų–deformacijų ryšys yra artimas tiesiniam iki pat suirimo (3.1 pav., a). Matricos medžiagos elgsena aiškiai skiriasi – jos takumo riba yra kur kas mažesnė nei gijų medžiagos. Be to, matricos medžiaga gali patirti dideles plastines deformacijas (3.1 pav., b). LS-DYNA baigtinių elementų programa modeliuojant kompozito vidinę struktūrą taikomas *MAT_PLASTIC_KINEMATIC (*MAT_003) medžiagos modelis, kuriame elemento suirimas nurodomas kaip plastinė nutrūkimo deformacija. Aplinkinė sritis atkartoja reprezentatyvios srities vidinę struktūrą su tais pačiais tamprumo parametrais. Tam, kad būtų užtikrintas pradinis suirimas reprezentatyvioje srityje, aplinkinės srities plastinė nutrūkimo deformacija gijų medžiagai yra 1000, o matricos medžiagai – 10 kartų didesnė nei reprezentatyvioje srityje. Taip pasiekama, kad skaičiavimo trukmė nebūtų ištesinama dėl aplinkinės srities elementų netaisyklingos formos.

3.1 lentelė. Gijų ir matricos medžiagos mechaninės konstantos

	Gijų medžiaga	Matricos medžiaga
Jungo modulis, N/m ²	9E+10	3E+08
Puasono koeficientas	0,3	0,2
Takumo riba, N/m ²	3,5E+09	2E+07
Tankis, kg/m ³	1400	920
Nutrūkimo deformacija	0,001	0,5



3.1 pav. Efektyviųjų (von Mises) įtempių–efektyviųjų deformacijų kreivės gijų (a) ir matricos (b) medžiagoms

Skaičiavimams naudojami apskritimo skerspjūvio gijos, kurių spindulys $r = 4,5E - 05 \text{ m}$, o atstumas tarp gretimų gijų centrų (reprezentatyviojo elemento kraštinė) tame pačiame sluoksnyje ir gretimuose sluoksniuose yra $a = 1E - 4 \text{ m}$. Pagal šiuos duomenis apskaičiuota, kad gijų dalis medžiagoje yra $\alpha_f \approx 0,6362$, o matricos medžiagos dalis yra $\alpha_f \approx 0,3638$.

Stambioje skalėje baigtinių elementų programa LS-DYNA vienkrypčiam kompozitui taikomas homogeninės ortotropinės medžiagos modelis *MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC (*MAT_58), kurio tiesinės tamprumo savybės apibrėžiamos Jungo moduliais gijų bei gijoms statmenomis kryptimis (E_x, E_y, E_z), Puasono koeficientu (ν_{yx}) ir šlyties moduliais (G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}). Netiesinės savybės apibrėžiamos deformacijų ir stiprumo poromis tempimui gijų kryptimi (ε_{XT}, XT), tempimui gijoms statmena kryptimi (ε_{YT}, YT), gniuždymui gijų kryptimi (ε_{XC}, XC), gniuždymui gijoms statmena kryptimi (ε_{YC}, YC), šlyties (γ_{SC}, SC). Skaitiniuose eksperimentuose daroma prielaida, kad gniuždymo stiprumo vertės lygios atitinkamoms tempimo stiprumo vertėms. Be tamprumo ir suirimo parametrų, įtempių ir deformacijų kreivės medžiagos modelyje papildomai valdomos daugikliais SLIMs, SLIMTi, SLIMCi, kurie apriboja įtempių reikšmes po to, kai pasiekiamas medžiagos stiprumas tam tikra kryptimi. Jei pasiekiamas stiprumo ribą atitinkantis kreivės taškas, elemento įtempiai atitinkama kryptimi nepriklausomai nuo deformacijų dydžio sumažinami iki stiprumo vertės, padaugintos iš daugiklio SLIMii. Jei daugikliai lygūs 1, įtempimų vertės lieka maksimalios (lygios stiprumo vertėms). Tokia vertė taikoma gniuždymo įtempimų kreivėms (parametras SLIMCi). Jei buvo pasiekta maksimali tempimo ir šlyties

įtempių riba, atitinkami įtempiai sumažinami iki 10 % maksimalios vertės (SLIMTi ir SLIMS lygūs 0,1).

Vienkryptį kompozitą veikianti sfera modeliuojama kaip absoliučiai kietas kūnas (medžiagos modelis *MAT_RIGID (*MAT_020) baigtinių elementų programoje LS-DYNA) su medžiagos parametrais, pateiktais 3.2 lentelėje. Sfera nesideformuoja, bet šie parametrai taikomi vertinant sferos ir plokštelės kontaktą. Sferos paviršius modeliuojamas kevalais, o sferos masė lygi paviršiaus ribojamos pilnavidurės sferos, kurios tankis pateiktas 3.2 lentelėje, masei.

3.2 lentelė. Absoliučiai kietos sferos mechaninės konstantos

Jungo modulis, N/m ²	1,7E+010
Puasono koeficientas	0,4
Tankis, kg/m ³	11270

3.2. Tiesinių tamprumo parametrų nustatymas

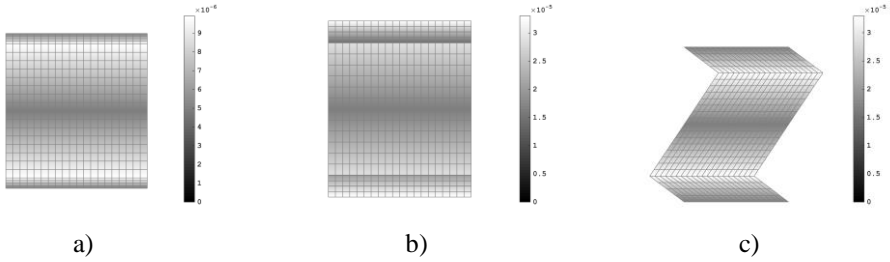
Tiesiniais medžiagos tamprumo parametrais apibūdinama medžiagos elgsena, kai nagrinėjamos mažos deformacijos ir galioja tiesinis įtempių bei deformacijų ryšys. Homogeninės ortotropinės medžiagos savybės apibrėžiamos Jungo moduliais statmenomis kryptimis, Puasono koeficientais ir šlyties moduliais, kurie apskaičiuojami pagal analitines formules arba išreiškiami iš paslankumo matricos **S** (jeigu ekvivalentūs parametrai baigtinių elementų metodu vertinami atliekant reprezentatyviojo elemento analizę, kai sukuriamos nepriklausomos deformacijos, arba asimptotinio homogenizavimo metodu). Skaitiniuose eksperimentuose tiesiniai parametrai apskaičiuojami ir pirmos, ir antros eilės modelių elementams bei atliekamas skirtingais metodais gautų tiesinių parametrų palyginimas.

3.2.1. Asimptotinis homogenizavimas

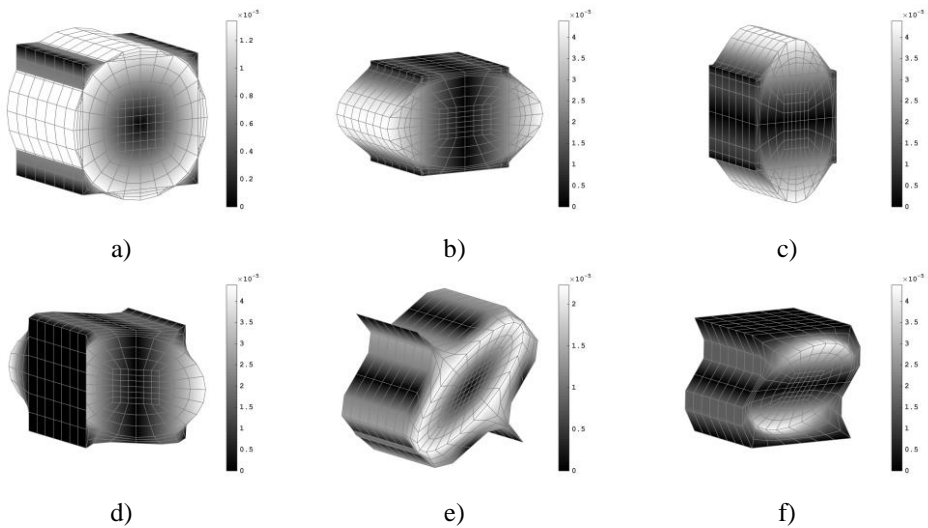
Asimptotinis homogenizavimas yra vienas tradicinių būdų tiesiniams medžiagos parametrams nustatyti. Šiame darbe asimptotinis homogenizavimas taikomas siekiant užtikrinti, kad tiesinių parametrų nustatymas iš reprezentatyviojo elemento nepriklausomų deformacijų analizės yra tinkamas tiesiniams parametrams vertinti. Asimptotinis homogenizavimas atliekamas pirmos ir antros eilės kompozito modelių reprezentatyviesiems elementams.

Asimptotinio homogenizavimo metu vienkrypčio kompozito reprezentatyviojo elemento modelyje taikomi pirmos eilės izoparametriniai elementai su prielaida, kad galioja tiesinis tamprumo dėsnis ir deformacijos yra mažos. 3.2 pav. vaizduojamas pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelis, kurio mazgams suteikti charakteringieji poslinkiai, apskaičiuoti pagal 18 formulę (3.2 pav., a), b), c) atitinka matricos χ pirmąjį, antrąjį ir trečiąjį stulpelius). Analogiškai 3.3 pav. vaizduojamas antros eilės vienkrypčio kompozito modelio reprezentatyvusis elementas, kurio koordinatės pasislinkusios per matricoje χ saugomas vertes (3.3 pav., a), b), c), d), e), f) atitinka matricos χ stulpelius). 3.2 pav. ir 3.3 pav. spalvomis žymimi apibendrintieji poslinkiai – kiekvieno mazgo poslinkių vektorius norma.

Mazginių jėgų matrica F^D gaunama integruojant sudedamųjų medžiagų tamprumo savybių gradientus. Dėl labai skirtingų medžiagų savybių apskaičiuotos jėgos medžiagų sandūroje yra kur kas didesnės nei tos pačios medžiagos elementų sandūrose. Tai lemia, kad vidiniai modelio mazgai atsiduria modelio išorėje (3.2 pav., b); 3.3 pav., a), b), c)). Nepaisant charakteringųjų poslinkių formos, kai elementai persidengia, skaičiuojant homogenizuotos struktūros tamprumo matricą taikomi iš 18 formulės išreikšti charakteringieji poslinkiai.



3.2 pav. Charakteringosios pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio reprezentatyviojo periodinio elemento formos, apskaičiuotos asimptotinio homogenizavimo metodu (spalvomis vaizduojami apibendrintieji poslinkiai)



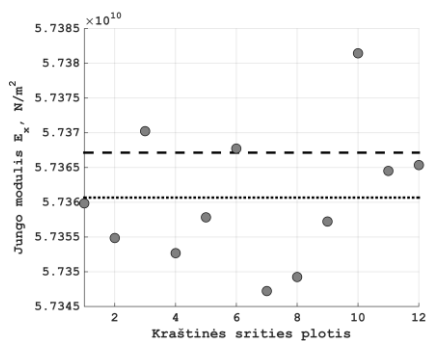
3.3 pav. Charakteringosios antros eilės vienkrypčio kompozito modelio reprezentatyviojo periodinio elemento formos, apskaičiuotos asimptotinio homogenizavimo metodu (spalvomis vaizduojami apibendrintieji poslinkiai)

Antros eilės kompozito modelyje nagrinėjamos apvalaus skerspjūvio gijos, todėl gijų krypties statmenoje YZ plokštumoje modelis yra simetrinis. Elemento charakteringieji poslinkiai, atitinkantys tamprumo savybių gradientus Y kryptimi (3.3 pav., b), lygūs 90° kampu YZ plokštumoje pasuktiems poslinkiams, apskaičiuotiems pagal Z krypties gradientus (3.3 pav., c). Analogiškai šlytį XY charakterizuojantys poslinkiai (3.3 pav., d) atitinka 90° kampu YZ plokštumoje

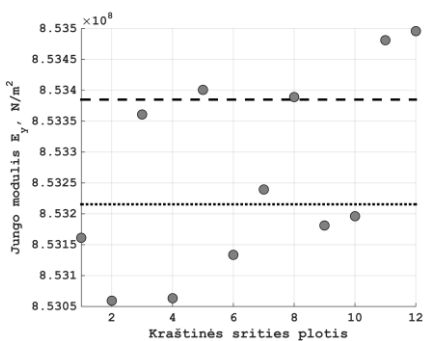
pasuktiems šlytį ZX sudarantiems poslinkiams (3.3 pav., f). Iš čia išplaukia, kad homogeninės medžiagos tamprumo savybės Y ir Z kryptimis yra vienodos.

3.2.2. *Reprezentatyviojo elemento analizė baigtinių elementų metodu*

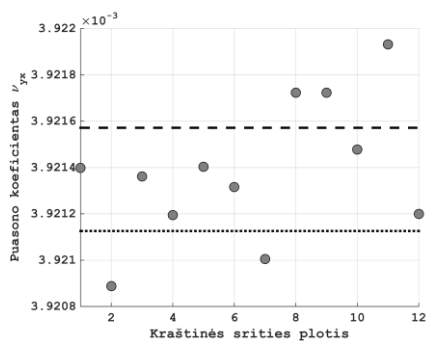
Kai tiesiniai tamprumo parametrai nustatomi analizuojant grynąjį deformacijų schemomis veikiamą reprezentatyvųjį elementą, svarbu tinkamai parinkti kraštines sąlygas šlyties deformacijoms. 3.4 pav. pateikta ekvivalenčių tiesinių parametru priklausomybė nuo aplinkinės srities pločio, kai reprezentatyvųjį elementą XY plokštumoje iš visų pusių supa nuo 1 iki 12 tokio paties dydžio periodinių elementų. Akivaizdu, kad Jungo moduliai gijų bei gijoms statmena kryptimis ir Puasono koeficientai nuo aplinkinės srities pločio nepriklauso, nes jų vertės, apskaičiuotos centriniam elementui su skirtingo pločio aplinkine sritimi, skiriasi mažiau nei 0,1 %. Į mažiausio bei didžiausio įverčių ribas patenka ir įverčiai, gauti asimptotinio homogenizavimo metodu bei atliekant vieno reprezentatyviojo elemento analizę su pakeistomis šlyties kraštinėmis sąlygomis, kai elemento kraštinėms leidžiama judėti laisvai kita nei tą pačią ar jai priešingą kraštinę veikiančia kryptimi. Antra vertus, šlyties modulio vertė priklauso nuo aplinkinės srities pločio ir jį didinant artėja prie įverčio, gaunamo asimptotinio homogenizavimo metodu ar nereikalaujant tiesių kraštų sąlygos šlyties deformacijose. Šlyties modulio įverčiai, kai elementas supamas 11 ir 12 aplinkinių elementų, skiriasi mažiau nei 1 %. Be to, šie įverčiai nuo įverčio, gauto su laisvomis kraštinėmis sąlygomis, taip pat skiriasi mažiau nei 1 %. Todėl tariama, kad pasiektas galimas parametru tikslumas ir toliau didinti aplinkinės srities neverta, o laisvos kraštinės sąlygos yra tinkamos tiesiniams parametrams vertinti.



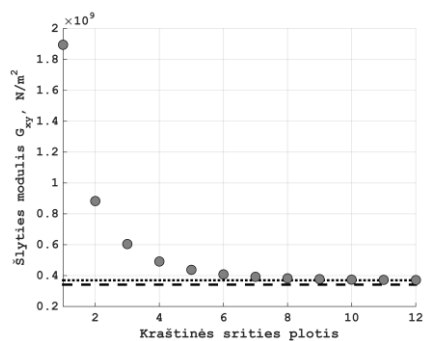
a)



b)



c)

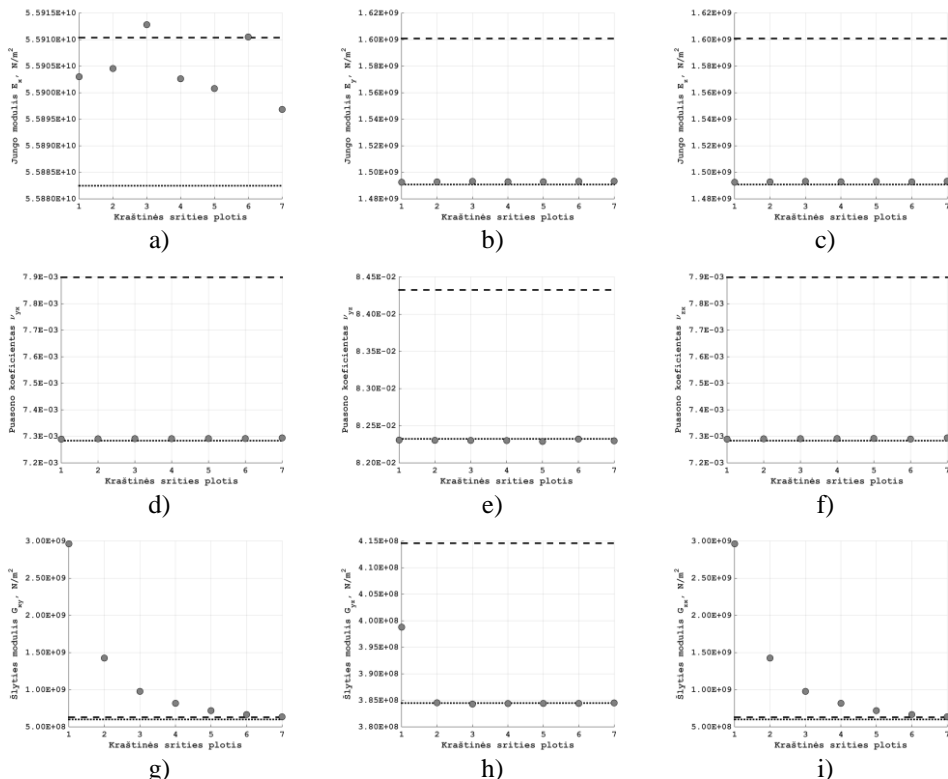


d)

3.4 pav. Ekivalentūs medžiagos parametrai pagal aplinkinės srities plotį (periodiniais elementais): a) – išilginis Jungo modulis E_x , b) – skersinis Jungo modulis E_y , c) – Puasono koeficientas ν_{yx} , d) – šlyties modulis G_{xy} . Taškine linija vaizduojami parametrai, gauti taikant pakeistą laisvų kraštų šlyties schemą vienam reprezentatyviajam elementui, brūkšnine – asimptotinio homogenizavimo rezultatai pirmos eilės vienkrypčio kompozito modeliui. Kraštinės srities plotis matuojamas periodinių elementų skaičiumi

Panaši analizė atliekama ir su antros eilės vienkrypčio kompozito modeliui, kai reprezentatyvusis elementas visomis ašimis supamas aplinkinės srities. Nagrinėjamas srities plotis nuo 1 iki 7 periodinių elementų. 3.5 pav. pavaizduota tiesinių parametru priklausomybė nuo aplinkinės srities pločio. Jungo modulių E_x , E_y , E_z , Puasono koeficientų ν_{yx} , ν_{yz} , ν_{zx} vertės nuo jų vidutinių verčių skiriasi mažiau nei 0,5 %. Be to, nepriklausomai nuo aplinkos pločio, šių parametru vertės skiriasi mažiau nei 0,5 % nuo verčių, gautų vienam reprezentatyviajam elementui su laisvų kraštų sąlygomis, ir mažiau nei 10 % nuo asimptotinio homogenizavimo įverčių. Šlyties modulio G_{yz} vertės visiems aplinkos pločiams nuo vidutinės vertės skiriasi mažiau nei 5 % ir patenka tarp įverčių, gautų reprezentatyviajam elementui su laisvų kraštinių sąlyga ir asimptotinio homogenizavimo metodu. Šlyties modulių G_{xy} ir G_{zx} vertės, gautos prie 7 periodinių aplinkos elementų, nuo įverčių, gautų su laisvomis kraštinėmis sąlygomis, skiriasi mažiau nei 10 %, o nuo asimptotinio homogenizavimo įverčių – mažiau nei 1 %. Be to, G_{xy} ir G_{zx} vertės, apskaičiuotos su 6 ir 7 aplinkos elementais,

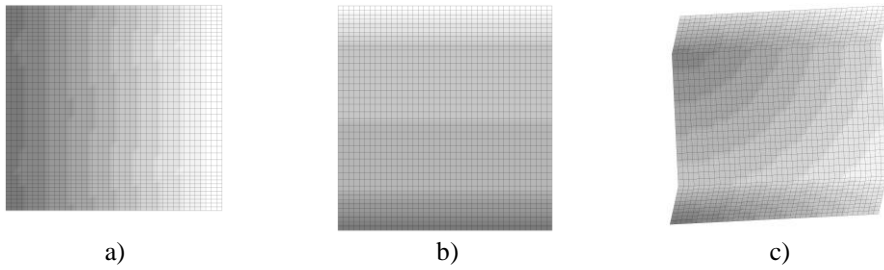
skiriasi mažiau nei 5 %. Tariama, kad norimas tikslumas pasiektas, o laisvų kraštų sąlygos tinka ir antros eilės vienkrypčio kompozito tiesiniams parametrams vertinti.



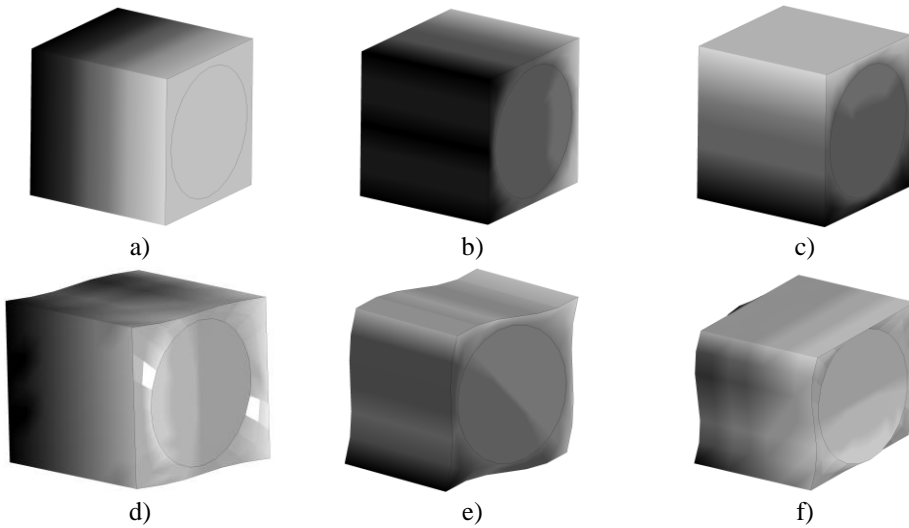
3.5 pav. Ekvivalentūs medžiagos parametrai pagal aplinkinės srities plotį (periodiniai elementais): a) – išilginis Jungo modulis E_x , b), c) – skersiniai Jungo moduliai E_y , E_z , d), e), f) – Puasono koeficientai ν_{yx} , ν_{yz} , ν_{zx} , g), h), i) – šlyties moduliai G_{xy} , G_{yz} , G_{zx} .

Taškine linija vaizduojami parametrai, gauti taikant pakeistą laisvų kraštų šlyties schemą vienam reprezentatyviajam elementui, brūkšnine – asimptotinio homogenizavimo rezultatai antros eilės vienkrypčio kompozito modeliui. Kraštinės srities plotis matuojamas periodinių elementų skaičiumi

Pirmos eilės reprezentatyvūs elementas, kuriam sukuriamos nepriklausomos deformacijos pagal 30, 31, 33 formules, įgyja formas, vaizduojamas 3.6 pav. Antros eilės reprezentatyviojo elemento formos, kurias jis įgyja veikiamas pagal 34–35, 40–42 kraštines sąlygas, įgyja formas, vaizduojamas 3.7 pav. Šios deformacijos yra tiesiškai nepriklausomos ir atitinka asimptotinio homogenizavimo metodu nagrinėtas būsenas. 3.6 pav. ir 3.7 pav. spalvos kinta pagal skalę nuo juodos iki baltos; čia balta spalva žymimos reprezentatyviojo elemento sritys, kuriose poslinkiai didžiausi, juoda – sritys, kuriose poslinkiai mažiausi (įtvirtinti mazgai).



3.6 pav. Deformuoto reprezentatyviojo elemento būsenos (apibendrintieji poslinkiai)



3.7 pav. Deformuoto reprezentatyviojo elemento būsenos (apibendrintieji poslinkiai)

3.2.3. Tiesinių tamprumo parametrų palyginimas

3.3 lentelėje pateikti tiesiniai tamprumo parametrai, įvertinti analitinėmis formulėmis, asimptotinio homogenizavimo metodu (AH) ir reprezentatyviojo elemento analizė baigtinių elementų metodu, kai kraštinėms sienoms šlyties deformacijų metu leidžiama judėti laisvai. Jungo modulis gijų kryptimi E_x , apskaičiuotas skirtingais metodais, skiriasi mažiau nei 2 %, Puasono koeficientas ν_{xy} – mažiau nei 5 %. Kiti tamprumo parametrai priklauso nuo nagrinėjamo modelio eilės.

3.3 lentelė. Vienkrypčio kompozito tiesinių parametų įverčiai

		Analiniai įverčiai	Pirmos eilės modelis		Antros eilės modelis	
			AH	BEM	AH	BEM
Jungo modulis, N/m ²	E_x	5,7365e+10	5,7367e+10	5,7368e+10	5,6718e+10	5,5882e+10
	E_y	7,5675e+08	8,5338e+08	8,5338e+08	1,5367e+09	1,4315e+09
	E_z				1,5367e+09	1,4315e+09
Puasono koef.	ν_{xy}	0,2636	0,2636	0,2636	0,2758	0,2729
	ν_{yz}				0,1069	0,1098
	ν_{zx}				0,0075	0,0070
Šlyties modulis, N/m ²	G_{xy}	3,4141e+08	3,4144e+08	3,6963e+08	6,2309e+08	5,9152e+08
	G_{yz}				4,0000e+08	3,8500e+08
	G_{zx}				6,2309e+08	5,9152e+08

3.3 lentelėje pateikti tiesiniai parametrai, apskaičiuoti pagal antros eilės modelį, skiriasi nuo pateiktų antros eilės modelio kraštinių sąlygų konvergavimo tyrime (3.2.2 poskyryje), nes dėl ribotų skaičiavimo išteklių konvergavimo tyrimui taikomas kur kas grubesnis skaidymas.

Jungo modulio gijoms statmena kryptimi E_y įverčiai, apskaičiuoti asimptotinio homogenizavimo metodu ir taikant baigtinių elementų analizę atitinkamam nepriklausomų deformacijų skaičiui, tarp tos pačios eilės modelių skiriasi mažiau nei 5 %. Dėl skirtingų prielaidų, taikomų analitiniais įverčiams ir skaitiniams modeliams, atsiranda didesnis nei 10 % skirtumas. Be to, analitinėmis formulėmis ir pirmos eilės modelio analizėje nevertinamas Jungo modelis storio kryptimi, Puasono koeficientai ν_{yz} ir ν_{zx} , šlyties moduliai G_{yz} , G_{zx} . Šių parametų įverčiai, gauti skirtingais metodais, antros eilės modeliui skiriasi mažiau nei 10 %. Dėl antros eilės modelio reprezentatyviojo elemento simetriškumo ekvivalenčios medžiagos savybės gijoms statmenomis kryptimis yra vienodos.

3.2.4. Reprezentatyviojo elemento forma

Antros eilės vienkrypčio kompozito standartinis reprezentatyvusis elementas yra kubo formos. Baigtinių elementų analizės metu tokiam elementui sukuriama vienodo dydžio ašinės deformacijos ir vienodo dydžio šlyties deformacijos trijose plokštumose. Jei nagrinėjamas netipinis reprezentatyvusis elementas (skirtingų kraštinių ilgių stačiakampis gretasienis, apibrėžiantis pasuktos medžiagos heterogeniškumą), turi būti užtikrinamas jo periodiškumas. Tačiau užtikrinti, kad elementas liktų kubo formos, pavyksta ne su visais elementų tipais. Tariama, kad reprezentatyviojo elemento forma įtakos neturi, jei užtikrinamas elemento periodiškumas ir tokiam elementui apskaičiuoti tiesiniai parametrai skiriasi nežymiai nuo parametų, apskaičiuotų kubiniam elementui. Jei elemento kraštinės (ilgis, plotis, aukštis) lygios a , b , c , tiesinių parametų nustatymui taikomos sąlygos perrašomos:

$$\text{I: } \begin{aligned} u(a, y, z) = \delta, \quad u(0, y, z) = 0, \\ v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0; \end{aligned} \quad (69)$$

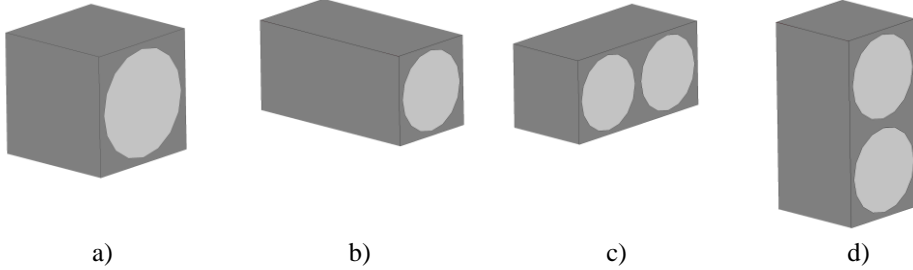
$$\text{II: } \begin{aligned} u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, b, z) = \delta, \\ v(x, 0, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0; \end{aligned} \quad (70)$$

$$\text{III: } u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0, \quad \omega(x, y, c) = \delta, \quad \omega(x, y, 0) = 0; \quad (71)$$

$$\text{IV: } u(x, b, z) = \delta, \quad u(x, 0, z) = 0, \quad v(a, y, z) = \delta, \quad v(0, y, z) = 0, \quad \omega(x, y, 0) = \omega(x, y, c) = 0; \quad (72)$$

$$\text{V: } u(0, y, z) = u(a, y, z) = 0, \quad v(x, y, c) = \delta, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad \omega(x, b, z) = \delta, \quad \omega(x, 0, z) = 0; \quad (73)$$

$$\text{VI: } u(x, y, c) = \delta, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, 0, z) = v(x, b, z) = 0, \quad \omega(a, y, z) = \delta, \quad \omega(0, y, z) = 0. \quad (74)$$



3.8 pav. Reprerentatyviųjų elementų tipai

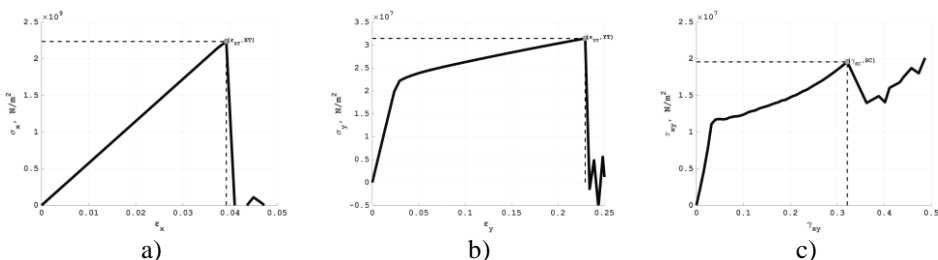
Reprerentatyviojo elemento formos įtakai patikrinti nagrinėjami trijų tipų reprerentatyvieji elementai, kurių kraštinė viena kryptimi yra dvigubai didesnė nei kitomis ir išlaikoma periodiškumo sąlyga (3.8 pav., b), c), d)). 3.4 lentelėje pateikti tiesiniai parametrai, gauti nagrinėjant šiuos elementus, ir palyginimas su gautais nagrinėjant kubinį periodinį elementą (3.8 pav., a). Nesunku pastebėti, kad nuo kubinio elemento parametų skiriasi parametrai ta ašimi, kuria nagrinėjamo elemento kraštinė dvigubai ilgesnė. Tarkime, 3.8 pav., b) tipo modelio, kurio kraštinė dvigubai ilgesnė gijų (X) kryptimi, atveju nuo kubinio elemento skiriasi Jungo modulis E_x ir šlyties moduliai G_{xy} ir G_{zx} . Vis dėlto skirtingų reprerentatyviųjų elementų parametrai skiriasi nežymiai (mažiau nei 1 %), todėl galima teigti, kad nagrinėjamos srities forma įtakos neturi.

3.4 lentelė. Vienkrypčio kompozito tiesinių parametų įverčiai

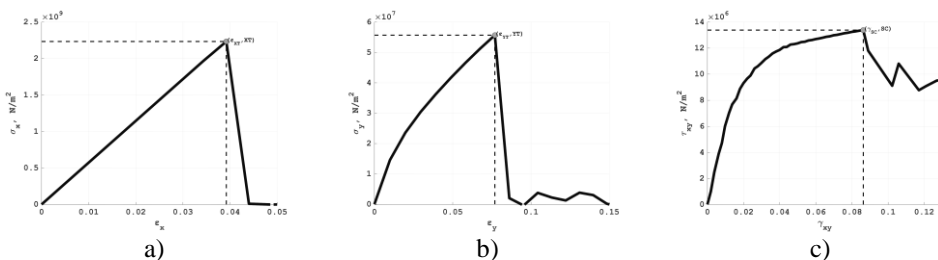
		Reprerentatyviojo modelio tipas (3.8 pav.)			
		a)	b)	c)	d)
Jungo modulis, N/m^2	E_x	5,5882e+10	5,5896e+10	5,5882e+10	5,5882e+10
	E_y	1,4315e+09	1,4315e+09	1,4327e+09	1,4315e+09
	E_z	1,4315e+09	1,4315e+09	1,4315e+09	1,4327e+09
Pusono koef.	ν_{xy}	0,2729	0,2729	0,2729	0,2729
	ν_{yz}	0,1098	0,1098	0,1098	0,1097
	ν_{zx}	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070
Šlyties modulis, N/m^2	G_{xy}	5,9152e+08	5,9198e+08	5,9165e+08	5,9152e+08
	G_{yz}	3,8500e+08	3,8500e+08	3,8500e+08	3,8500e+08
	G_{zx}	5,9152e+08	5,9197e+08	5,9152e+08	5,9164e+08

3.3. Netiesinių tamprumo parametrų nustatymas

Vienkrypčio kompozito stiprumo parametrai nustatomi iš pirmos ir antros eilės modelių taikant išreikštinę baigtinių elementų metodo analizę. Pirmos eilės modelio reprezentatyviajam elementui atitinkamomis kryptimis suteikiami tiesiškai didėjantys poslinkiai pagal schemas, aprašomas formulėmis 30, 31, 33, antros eilės modeliui – pagal formules 34, 35, 40. Šlyties stiprumui nustatyti reprezentatyvusis elementas patalpinamas į vieno elemento pločio aplinkinę sritį, kuri užtikrina tolygias kraštines sąlygas plastinių deformacijų metu. Poslinkių kitimo greitis parenkamas taip, kad iš dvigubai mažesniu greičiu tempiamo reprezentatyviojo elemento įvertintos stiprumo (ir atitinkamos deformacijų) vertės skiriasi mažiau nei 10 %. Stiprumo vertės gijų (XT), gijoms statmena (YT) kryptimis bei šlyties stiprumas (SC) ir juos atitinkančios deformacijos (ϵ_{XT} , ϵ_{YT} , γ_{SC}), pateikiamos 3.5 lentelėje, įvertinamos maksimalių įtempių kriterijumi iš kreivių, pateiktų 3.9 pav. pirmos eilės modeliui ir 3.10 pav. antros eilės modeliui.



3.9 pav. Pirmos eilės kompozito modelio įtempių–deformacijų kreivės netiesinių parametrų nustatymui: gijų kryptimi (a), gijoms statmena kryptimi (b), šlyties (c)



3.10 pav. Antros eilės kompozito modelio įtempių–deformacijų kreivės netiesinių parametrų nustatymui: gijų kryptimi (a), gijoms statmena kryptimi (b), šlyties (c)

Vienkrypčio kompozito elgseną gijų kryptimi lemia gijų stiprumas, o gijų forma įtakos beveik neturi, todėl kompozito įtempių–deformacijų gijų kryptimi ryšiai, gauti iš pirmos eilės modelio (3.9 pav., a) ir iš antros eilės modelio (3.10 pav., b) atkartoja gijų medžiagos savybes – yra tiesiniai iki suirimo (3.1 pav., a). Stiprumo vertės XT , apskaičiuotos baigtinių elementų modeliams ir analitinėmis formulėmis, skiriasi mažiau nei 10 % (3.5 lentelė). Be to, deformacijos ϵ_{XT} , kurioms esant pasiekiamos XT vertės, taip pat skiriasi mažiau nei 10 %.

Kompozito elgseną gijoms statmena kryptimi ir šlyties atveju lemia abi sudedamosios medžiagos, šia kryptimi svarbi ir sudedamųjų komponentų geometrinė

forma. Pirmos eilės modelyje gijų forma nėra vertinama, todėl įtempių–deformacijų gijoms statmena kryptimi (3.10 pav., b) ir esant šlyčiai (3.10 pav., c) atitinka matricos medžiagos elgseną – patiria dideles plastines deformacijas (3.1 pav., b). Analitinis kompozito stiprumo gijoms statmena kryptimi YT įvertis yra ~2 kartus mažesnis už įvertį, apskaičiuotą antros eilės kompozito modeliui (kai įvertinama gijų forma). Analitinis įvertis yra artimesnis pirmos eilės kompozito modelio įverčiui, kai modelyje vertinama tik gijų kryptis ir sudedamųjų medžiagų dalys. Pirmos eilės modeliui apskaičiuotą stiprumo vertę statmena gijoms kryptimi atitinkanti deformacija yra ~3 kartus didesnė už vertę, apskaičiuotą antros eilės modeliui, o šlyties stiprumo vertę atitinkanti deformacija – ~3,7 karto. Tokius rezultatus lemia tai, kad plastiškas matricos medžiagos įsimas beveik neturi įtakos gijų medžiagai pirmos eilės kompozito modelyje. Šlyties stiprumui ir deformacijų vertėms, kai pasiekiamas šlyties stiprumas ar kai pasiekiamas stiprumas gijoms statmena kryptimi, nustatyti analitinės formulės netaikomos.

3.5 lentelė. Vienkrypčio kompozito stiprumo įverčiai, apskaičiuoti pagal analitines formules, pirmos ir antros eilės vienkrypčio kompozito modeliams

	Analitiniai įverčiai	Pirmos eilės modelis	Antros eilės modelis
XT , N/m ²	2,0652e+09	2,2360e+09	2,2331e+09
YT , N/m ²	2,7000e+07	3,1442e+07	5,5664e+07
SC , N/m ²		1,9572e+07	1,3385e+07
ϵ_{XT}	0,036	0,0392	0,0392
ϵ_{YT}		0,2295	0,0770
γ_{SC}		0,3213	0,0861

3.4. Suirimo kriterijaus nustatymas (efektyviosios suirimo deformacijos (ESD) parinkimas)

Stambios skalės modelio atveju kevalo elementas pašalinamas iš modelio, jeigu elemento efektyvioji deformacija pasiekia nurodytą reikšmę – efektyviąją suirimo deformaciją (ESD). ESD smulkioje skalėje nustatoma išreikštine analize modeliuojant neašinį testą, kai tempiama įvairiais kampais pasukta stačiakampė sritis su 2.10 pav. pavaizduotomis kraštinėmis sąlygomis. Kad apkrovos pasiskirstytų tolygiai, reprezentatyvi sritis patalpinama aplinkoje su didesnėmis nutrūkimo deformacijomis. Nagrinėjamos srities dydis, aplinkinės srities plotis, skaidymo tankumas parenkami analizuojant įvairaus dydžio reprezentatyvius elementus, supamus aplinkinės srities, kurios plotis atitinka vieną, du ar daugiau reprezentatyviųjų elementų. Skaičiuojamas ir į medžiagos koordinatų sistemą pasukamas tiesinis tamprumo tenzorius, kai struktūrai pagal 57–62 formulėse pateiktas kraštines sąlygas sudaromos nepriklausomos deformacijos. Tariama, kad struktūra parinkta tinkamai, jeigu jai apskaičiuotas tamprumo tenzorius nuo apskaičiuoto nepasuktam reprezentatyviajam elementui skiriasi mažiau nei 0,001 normuotos vidutinės kvadratinės paklaidos, apskaičiuotos pagal 53 formulę, prasme.

Vidinėje srityje, pagal kurią skaičiuojamas tamprumo tenzorius, o vėliau ir nutrūkimo deformacijos, skaidymas yra kur kas tankesnis nei aplinkinėje. Aplinkinėje

sirtyje gali būti taikomas kur kas grubesnis skaidymas, nes šios srities elementai naudojami tik kraštinėms sąlygoms perduoti į vidinę sritį ir užtikrinti tolygų apkrovos pasiskirstymą. Homogeninės medžiagos kevalo elementas atitinka medžiagos sluoksnio plokštumą (XY), todėl aplinkinė sritis reprezentatyvią sritį supa tik šioje plokštumoje. Vidinės srities, pagal kurią skaičiuojamas tamprumo tenzorius, kraštinės yra dvigubai ilgesnės nei minimalios periodinės pasuktos medžiagos struktūros kraštinės. Taip siekiama sumažinti perėjimo tarp vidinės ir aplinkinės srities įtaką nutrūkimui. Aplinkinė sritis sudaroma iš vidinės srities dydžio periodinių elementų.

3.6 lentelėje pateiktos normuotos vidutinės kvadratinės paklaidos vertės nurodytais kampais pasuktoms struktūroms su skirtingais aplinkos pločiais. Pirmos eilės modeliai žymimi raide B , antros eilės modeliai – raide C . Skaičius prie raidės nusako kampą (laipsniais), kurį medžiagos koordinačių sistemos X' ašis (gijų kryptis) sudaro su globaliosios koordinačių sistemos X ašimi. Abiejų eilių modeliams norimas tikslumas ($R < 0,001$) pasiekiamas, kai 15° ir 75° kampais pasukti modeliai apsupti vieno vidinės srities pločio aplinkine sritimi, o kitų kampų atvejais – dviejų vidinių sričių pločio aplinkine sritimi. Didesnis tikslumas gali būti pasiektas smulkinant skaidymą ar keičiant aplinkinės srities plotį, nagrinėjamų sluoksnių skaičių, tačiau tokios modifikacijos didina elementų skaičių modelyje, o kartu ir skaičiavimams reikalingus išteklius.

3.6 lentelė. Tenzorių tikslumo įverčiai R

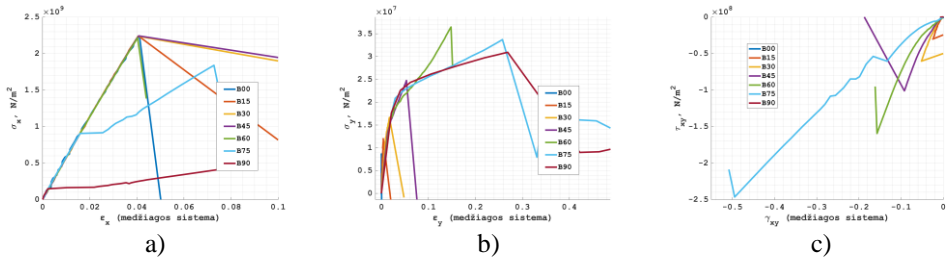
Aplinkos plotis ¹	Pirmos eilės modeliai						
	B00	B15	B30	B45	B60	B75	B90
1	0,00276	0,00088	0,00165	0,00186	0,00170	0,00046	0,00278
2	0,00096	0,00086	0,00066	0,00045	0,00056	0,00023	0,00095
Aplinkos plotis	Antros eilės modeliai						
	C00	C15	C30	C45	C60	C75	C90
1	0,00282	0,00071	0,00123	0,00182	0,00108	0,00075	0,00260
2	0,00079	0,00064	0,00072	0,00090	0,00072	0,00063	0,00092

Parinkto dydžio medžiagos fragmentui, kurio gijos su globaliosios koordinačių sistemos X ašimi sudaro tam tikrą kampą, maksimalios efektyviosios deformacijos (ESD) vertės apskaičiuojamos laiko momentu, kai fiksuojamas modelio gijų suirimas arba kai bent vienas reprezentatyvios srities kampinis mazgas (pagal kurį skaičiuojamos deformacijos) nepriklauso nė vienam elementui.

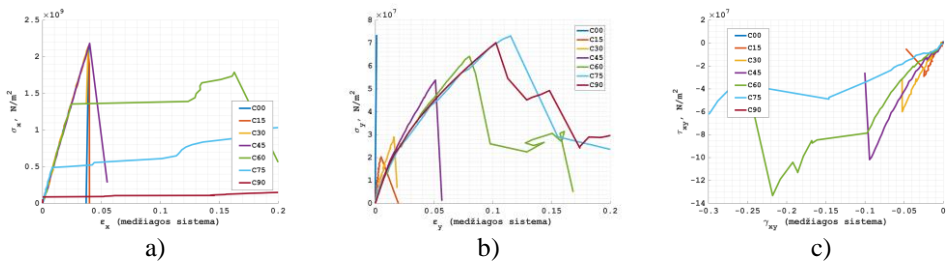
3.11 pav. ir 3.12 pav. vaizduojamos įtempimų–deformacijų kreivės medžiagos koordinačių sistemoje atitinkamai pirmos ir antros eilės modeliams, kai atliekamas tempimas su vienkrypčio kompozito medžiagos fragmentu. Modeliai B00, B15, B30, B45, B60 (3.11 pav., a) bei C00, C15, C30, C45 (3.12 pav., a) pasiekia stiprumą gijų kryptimi ir suyra dėl to, kad nutrūksta gijos. Dėl gijų nutrūkimo suyra ir matricos medžiaga, todėl tuo pačiu metu stebimas staigus kritimas skersinių ir šlyties įtempimų kreivėse (3.11 pav., b), c) ir 3.12 pav., b), c)), o nagrinėjama sritis suyra visiškai. Modelių B75, B90, C60, C75 ir C90 matricos medžiaga suyra anksčiau nei nutrūksta

¹ Aplinkos plotis matuojamas vidinę sritį atitinkančių elementų skaičiumi.

gijos. Pagal šiuos modelius apskaičiuota ESD vertė kur kas didesnė, nes gijos juda nelaikomos matricos medžiagos, modeliai nepasiekia medžiagos stiprumo gijų kryptimi, o maksimalios įtempių vertės pasiekiamos esant kur kas didesnėms deformacijoms. Modelio C75 analizės metu ištrinami visi elementai, kuriems priklauso kampinis reprezentatyvios srities mazgas, todėl ESD įvertis šiam modeliui apskaičiuojamas laiko momentu prieš paskutinio elemento, kuriam priklauso kampinis mazgas, ištrynimą. Gijos nenutrūksta atliekant modelių B90 ir C90 analizę. Poveikis 90° kampu pasuktam modeliui globaliosios sistemos X kryptimi atitinka skersinę apkrovą nepasuktam elementui. Šiam modeliui dirbtinai priskiriama ESD vertė, lygi 3, kad iš modelio būtų ištrinami netaisyklingą formą įgiję elementai. Nors modeliams, kuriuose gijos suyra anksčiau už matricą, įtempimų gijų kryptimi kreivės iki nutrūkimo skiriasi nežymiai, nutrūkimas pasiekiamas esant didesniems įtempiams ir deformacijoms gijoms statmena kryptimi tiriant modelius, kurių gijų kampas su tempimo ašimi sudaro didesnę kampą, t. y. vis didesnę įtaką medžiagos elgsenai turi matrica. Didėjant matricos medžiagos įtakai, auga deformacijų, kurioms esant pasiekiamas nutrūkimas, vertės.



3.11 pav. Išilginių (a), skersinių (b) ir šlyties (c) įtempių–deformacijų kreivės medžiagos koordinatinių sistemoje pirmos eilės modeliams



3.12 pav. Išilginių (a), skersinių (b) ir šlyties (c) įtempių–deformacijų kreivės medžiagos koordinatinių sistemoje antros eilės modeliams

Modeliai B60, B75, C60, C75, C90 įgyja didesnius įtempimus gijoms statmena kryptimi nei iš atitinkamos eilės reprezentatyviojo elemento nustatyta stiprumo šia kryptimi vertė (3.11 pav., b ir 3.12 pav., b). Modeliui C00 gijoms statmena kryptimi maksimalūs įtempimai įgyjami, kai deformacija artima nuliui. Staigus įtempimų gijoms statmena kryptimi šuolis sutampa su įtempimų gijų kryptimi kreivės kritimu, t. y. gaunamas jau po to, kai įvertinama ESD reikšmė.

Pirmos eilės modelių atveju didžiausi šlyties įtempimai pasiekiami B75 modeliui po to, kai suyra matricos elementai (3.11 pav., c). Tarp modelių, kurių gijos suyra

anksčiau nei matricos medžiaga, didžiausius šlyties įtempius pasiekia modelis, kurio gijos su tempimo ašimi sudaro didžiausią kampą – B60 (3.11 pav., c). Iš nagrinėtų antros eilės modelių didžiausius šlyties įtempius pasiekia modelis C60 po to, kai suyra matricos medžiaga ir gijos juda nepriklausomai viena nuo kitos (3.12 pav., c). Jei nagrinėjamos šlyties įtempių kreivės tik kol nėra suirusių elementų, didžiausi šlyties įtempiai stebimi 45° kampu pasuktam modeliui. Abiejų eilių modeliai pasižymi savybe, kad didėjant posūkio kampui šlyties įtempių ir deformacijų kreivės iki suirimo tampa nuožulnesnės. Modeliams B00, B90, C00 ir C90, kurių analizė atitinka ašinius bandymų modelius, šlyties įtempiai yra keliomis eilėmis mažesni už to paties modelio ašinius įtempius ir kitų modelių šlyties įtempius, o padidėjimas stebimas tik prasidėjus medžiagos irimui.

3.7 lentelėje pateiktos maksimalios efektyviosios deformacijos (ESD) vertės kiekvienam modeliui. Abiejų eilių modelių su vienodais pasukimo kampais įvertintos ESD reikšmės skiriasi mažiau nei 10 %, išskyrus 60° kampu pasuktus modelius. Pirmos eilės modelio B60 gijų medžiaga suyra anksčiau nei matrica, kartu suardydama ir matricos medžiagą. Tokiu pat kampu pasukto antros eilės modelio C60 matricos medžiaga suyra anksčiau nei gijų medžiaga, todėl šį modelį atitinkanti ESD reikšmė yra ~1,5 karto didesnė už pirmos eilės modelio reikšmę.

3.7 lentelė. ESD vertės

	Pirmos eilės modeliai						
	B00	B15	B30	B45	B60	B75	B90
ESD	0,048	0,057	0,084	0,142	0,269	1,275	3
	Antros eilės modeliai						
	C00	C15	C30	C45	C60	C75	C90
ESD	0,045	0,055	0,083	0,142	0,407	1,258	3

Pagal siūlomą kriterijų, kad ESD vertė apskaičiuojama modeliui, kurio gijos sudaro didžiausią kampą su globaliosios koordinatinių sistemos X ašimi, ir gijų elementai tempimo metu suyra anksčiau nei matricos elementai, pirmos eilės modeliams reikėtų taikyti vertę, apskaičiuotą B60 modeliui, antros eilės – C45 modeliui.

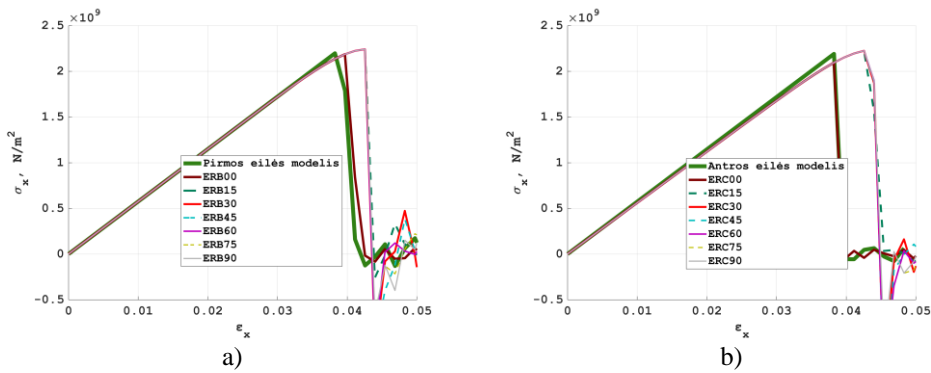
3.5. Ašinio poveikio modeliavimas

Ašiniai skaitiniai eksperimentai atliekami siekiant patikrinti, ar homogeninės medžiagos modelio su ekvivalenčiais parametrais elgsena yra suderinta su atitinkamos eilės heterogeninės medžiagos (atskaitos) modelio elgsena netiesinio įtempių–deformacijų sąryšio ribose.

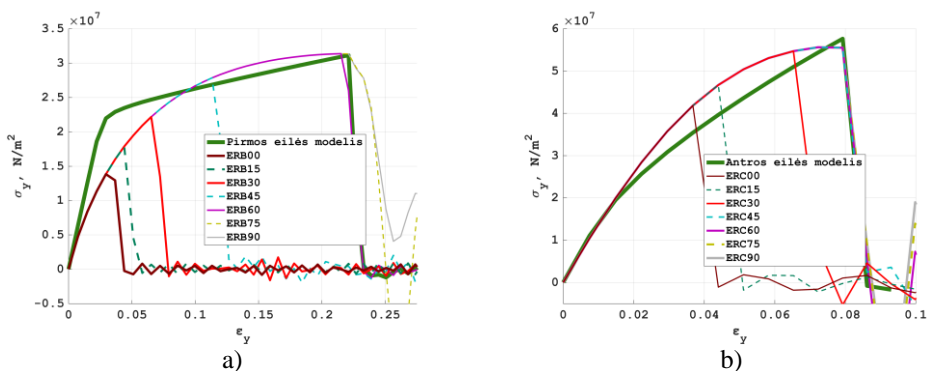
Atliekami dviejų tipų ašiniai skaitiniai eksperimentai – medžiagos plokštelė veikiama gijų kryptimi; medžiagos plokštelė veikiama gijoms statmena kryptimi. Poveikis nagrinėjamas vieno sluoksnio kvadratinei plokštelei (XY plokštumoje), kurios kraštinės ilgis lygus 2 mm (20 kartų ilgesnis nei tiesinių parametrų nustatymui naudojamas reprezentatyvusis elementas). Analizuojamos homogeninės medžiagos plokštelės su pagal pirmos (B tipo) arba antros (C tipo) eilės vienkrypčio kompozito modelį nustatytais tamprumo ir stiprumo parametrais (3.3 ir 3.5 lentelės). Skaičius

modelyje nurodo, koku kampu pasuktam modeliui buvo apskaičiuota homogeninės medžiagos modelyje taikoma ESD vertė (3.7 lentelė). Homogeninės medžiagos modelių įtempių ir deformacijų kreivės lyginamos su atitinkamos eilės atskaitos modelio kreivėmis (3.13 pav. ir 3.14 pav.). Kompozito plokštelės pirmos eilės atskaitos modelis sudaromas iš 10 201 mazgo, 10 000 kevalo elementų. Kompozito plokštelės antros eilės atskaitos modelis sudaromas iš 244 549 mazgų, 230 400 tūrinių elementų. Homogeninės medžiagos plokštelės modelį sudaro 441 mazgas, 400 elementų.

Tempimui gijų ašimi atskaitos pirmos eilės vienkrypčio kompozito modeliui ir homogeninės medžiagos modeliams taikomos kraštinės sąlygos, užrašomos formulėmis 30, o antros eilės atskaitos modeliui – formulėmis 34. Tempimui gijoms statmena kryptimi atitinkamai taikomos formulėmis 31 ir 35 aprašomos kraštinės sąlygos. Tiek tempimo gijų, tiek gijoms statmena kryptimis poslinkiai didėja 5 m/s greičiu.



3.13 pav. Tempimo gijų kryptimi įtempių–deformacijų kreivės



3.14 pav. Tempimo gijoms statmena kryptimi įtempių–deformacijų kreivės

3.13 pav. vaizduojamos tempimo gijų kryptimi įtempių ir deformacijos kreivės modeliams, kurių parametrai apskaičiuoti pagal pirmos (3.13 pav., a) ir antros (3.13 pav., b) eilės vienkrypčio kompozito modelius. Abiejų tipų modelių atveju

geriausiai atskaitos modelių kreives atitinka modeliai, kurių ESD vertės apskaičiuotos modeliui su nepasuktomis gijomis. Šių modelių maksimali įtempių vertė ir deformacija, kuriai esant ji pasiekama, nuo atskaitos modelio verčių skiriasi mažiau nei 5 %, nes toks modelis labiausiai atitinka ašinio testo kraštines sąlygas. Modeliams su kitomis ESD vertėmis įtempių–deformacijų kreivės kritimas stebimas esant daugiau nei 10 % didesnėms deformacijoms, tačiau maksimalios šių kreivių įtempimo taškų vertės nuo atitinkamo atskaitos modelio maksimalios įtempių vertės skiriasi mažiau nei 5 %.

3.8 lentelėje pateiktos modelio tempimo gijų kryptimi skaičiavimo trukmės. Tačiau dėl mažo elementų skaičiaus homogeninės medžiagos modeliuose skaičiavimai atliekami greitai ir neviršija 1,5 sekundės. Atskaitos modeliai sudaryti iš kur kas daugiau elementų, todėl pirmos eilės modelio rezultatai gaunami mažiau nei per 1 minutę, antros eilės modelio – per ~10 valandų.

3.8 lentelė. Tempimo gijų kryptimi testų skaičiavimo trukmės (val:min:s)

Pirmos eilės atskaitos modelis	00:00:35	Antros eilės atskaitos modelis	10:05:22
ERB00	00:00:01	ERC00	00:00:01
ERB15	00:00:01	ERC15	00:00:01
ERB30	00:00:01	ERC30	00:00:01
ERB45	00:00:01	ERC45	00:00:01
ERB60	00:00:01	ERC60	00:00:01
ERB75	00:00:01	ERC75	00:00:01
ERB90	00:00:01	ERC90	00:00:01

3.14 pav. vaizduojamos tempimo gijoms statmena kryptimi įtempių ir deformacijos kreivės modeliams, kurių parametrai apskaičiuoti pagal pirmos (3.14 pav., a) ir antros (3.14 pav., b) eilės vienkrypčio kompozito modelius. Pirmos eilės atskaitos modelį geriausiai atitinka *B* tipo modeliai, kurių ESD vertės apskaičiuotos 60°, 75°, 90° kampu pasuktiems modeliams – maksimali įtempių vertė ir deformacija, kuriai esant ši vertė pasiekama, nuo atskaitos modelio verčių skiriasi mažiau nei 5 %. Elementų ištyrinimas modelyje ERB60 pradedamas po to, kai pasiekiamas aukščiausias homogeninės medžiagos modelių įtempių gijoms statmena kryptimi taškas, – stebimas staigus kreivės kritimas vėlesniame analizės žingsnyje. Modeliuose ERB75 ir ERB90 toks kritimas stebimas vienu analizės žingsniu vėliau, o paskutinis kreivės taškas, skaičiuojamas modeliams be ištrintų elementų, nuo atskaitos modelio maksimalių įtempių taško skiriasi mažiau nei 1 % savo įtempių ir deformacijų vertėmis. *B* tipo homogeninės medžiagos modeliai, kurių ESD vertės apskaičiuotos pagal mažiau nei 60° kampu pasuktus medžiagos fragmentus, aukščiausio įtempių–deformacijų kreivės taško nepasiekia, nes juose elementai ištrinami per anksti. Antros eilės atskaitos modelį geriausiai atitinka ERC45, ERC60, ERC75, ERC90 – šie modeliai pasiekia maksimalų homogeninės medžiagos kreivės tašką, kurio įtempių vertė nuo atskaitos modelio maksimalios vertės skiriasi mažiau nei 5 %, o deformacijų – mažiau nei 10 %. Be to, šių modelių kreivės kritimas prasideda taške, kuris nuo atskaitos modelio kreivės kritimo pradžios taško deformacijų ir įtempių vertėmis skiriasi mažiau nei 5 %. Kai vienkryptis kompozitas

veikiamas gijoms statmena kryptimi, jo elgseną valdo matricos medžiaga, todėl tokio poveikio atveju artimiausi atskaitos modeliui rezultatai gaunami homogeninės medžiagos modelių atveju su ESD vertėmis, apskaičiuotomis matricos valdomiems modeliams.

3.9 lentelėje pateiktos modelio tempimo gijoms statmena kryptimi skaičiavimo trukmės. Kaip ir tempimo gijų kryptimi atveju, dėl mažo elementų skaičiaus homogeninės medžiagos modeliuose skaičiavimai atliekami greitai ir neviršija 1,5 sekundės. Pirmos eilės modelio rezultatai gaunami mažiau nei per 2 minutes, antros eilės modelio – per ~12 valandų. Kai modeliuojama apkrova gijoms statmena kryptimi, medžiagos elgseną valdo matricos medžiaga, kuri patiria dideles plastines deformacijas – nutrūksta vėlai, todėl skaičiavimai (atskaitos modeliams) užtrunka ilgiau nei modelio tempimo gijų kryptimi skaičiavimai.

3.9 lentelė. Tempimo gijoms statmena kryptimi testų skaičiavimo trukmės (val:min:s)

Pirmos eilės atskaitos modelis	00:01:10	Antros eilės atskaitos modelis	11:37:18
ERB00	00:00:01	ERC00	00:00:01
ERB15	00:00:01	ERC15	00:00:01
ERB30	00:00:01	ERC30	00:00:01
ERB45	00:00:01	ERC45	00:00:01
ERB60	00:00:01	ERC60	00:00:01
ERB75	00:00:01	ERC75	00:00:01
ERB90	00:00:01	ERC90	00:00:01

Skaitiniais ašiniiais tempimo eksperimentais parodyta, kad galima parinkti homogeninės medžiagos parametrus taip, kad homogeninės medžiagos ir atskaitos modelių elgsenos skirtumas būtų praktiškai priimtinas. Taigi tiriant pirmos eilės kompozito modelį panašius rezultatus galima gauti su 25 kartų mažiau elementų, tiriant antros eilės modelį – su 576 kartų mažiau elementų.

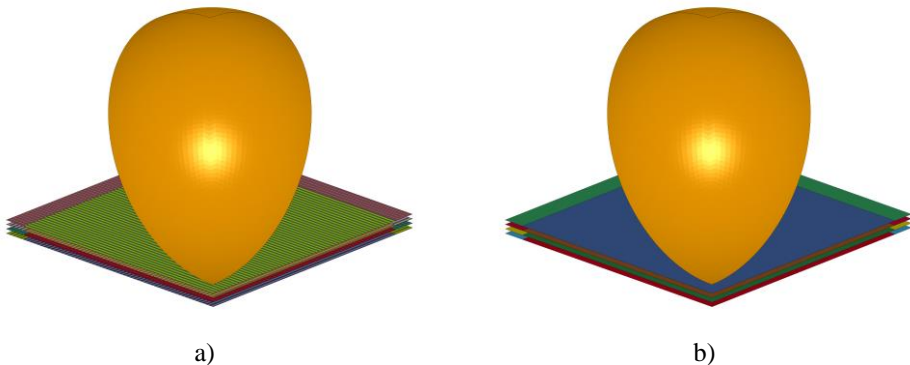
Kaip ESD įvertį siūloma taikyti didžiausią efektyviosios deformacijos vertę, apskaičiuotą modeliams, kuriuose gijos suyra anksčiau nei matricos medžiaga. Tokias vertes *B* ir *C* tipo modelių atveju atitinka ERB60 ir ERC45 homogeninės medžiagos modeliai. Tai mažiausiu kampu pasuktus medžiagos fragmentus atitinkantys modeliai, kurių įtempių–deformacijų gijoms statmena kryptimi kreivės pasiekia maksimalius įtempių taškus – medžiagos elgsena poveikio šia kryptimi atveju atitinka atskaitos modelio elgseną. Todėl tariama, kad ašiniams testams taip parinkta ESD vertė yra tinkama.

3.6. Dideliu greičiu judančios absoliučiai kietos sferos kontakto su vienkrypčiu kompozitu modeliavimas

Skaitiniais eksperimentais įvertinamas absoliučiai kietos sferos, judančios 440 m/s greičiu, kontaktas su kvadratinėmis vienkrypčio kompozito plokštelėmis, kurių storis lygus 0,1 mm. Skaitiniuose eksperimentuose nagrinėtos sferos skersmuo lygus 6 mm, o plokštelės kraštinės ilgis – 12 mm. Smulkios skalės modelyje nagrinėto reprezentatyviojo elemento kraštinės ilgis buvo lygus 0,1 mm, todėl plokštelės dydis

atitinka 120 gijų struktūrą. Jei atliekami skaičiavimai su modeliu, kuriame įvertinama kompozito vidinė struktūra, o sferos spindulio ir kompozito gijų spindulio santykis yra mažas, kiekvienos gijos suirimas turi didelę įtaką plokštelės stiprumui. Analogiškai, jeigu kompozitas aprašomas stambiais homogeninės medžiagos elementais, elemento panaikinimas plokštelėje pastebimai susilpnina plokštelę. Tam, kad būtų sumažinta vienos gijos (ar vieno elemento) suirimo įtaka visai modeliui elgsenai, sferos spindulio ir nagrinėjamo elemento kraštinės santykis turėtų būti padidintas ir reikėtų nagrinėti didesnius modelius. Tačiau didelių ar smulkaus skaidymo modelių analizė yra ribojama skaičiavimo išteklių.

Homogeninės medžiagos modeliai skaidomi kvadratiniais elementais, kurių kraštinės ilgis lygus reprezentatyviojo elemento kraštinės ilgiui. Atlikti skaitiniai eksperimentai su viena plokšte ir dviem, keturiomis bei aštuoniomis sukryžiuotomis plokštelėmis. Nelyginiuose sluoksniuose gijos lygiagrečios su globaliaja X ašimi, lyginiuose – su globaliaja Y ašimi. Pagal tokią pačią schemą keičiant medžiagos koordinačių sistemos padėtį globaliosios koordinačių sistemos atžvilgiu sudaromas modelis iš homogeninės medžiagos plokštelių. Gautas modelis yra simetris, todėl skaičiavimai gali būti sumažinti iki modelio ketvirčio analizės su simetrijos sąlygomis (įtvirtintais atitinkamais poslinkiais ir posūkiais simetrijos ašyse) (3.15 pav.).



3.15 pav. Sferos kontakto su 4 sukryžiuotais vienkrypčio kompozito sluoksniais, aprašomais pirmos eilės (kevalo elementų) modeliu (a), homogeninės medžiagos kevalo elementų modeliu (b), schema

Vienos plokštelės atskaitos modelį sudaro 90 601 mazgas, 90 000 elementų; dviejų – 181 202 mazgai, 180 000 elementų; keturių – 362 404 mazgai, 360 000 elementų; aštuonių – 724 808 mazgai, 720 000 elementų. Homogeninės medžiagos vienos plokštelės modelį sudaro 3721 mazgas, 3600 elementų; dviejų – 7442 mazgai, 7200 elementų; keturių – 14884 mazgai, 14400 elementų; aštuonių – 29768 mazgai, 28800 elementų. Skaičiavimuose taikomas sferos ketvirtis sudarytas iš 2841 mazgo, 2400 elementų.

Kompozito plokštelės modeliuojamos homogenine ortotropine medžiaga su ESD vertėmis, apskaičiuotomis skirtingais kampais pasuktiems medžiagos reprezentatyviesiems elementams. Sferos greičio kitimas dėl kontakto su homogeninės medžiagos modeliais lyginamas su rezultatais, gautais atskaitos

modeliui, kuriuo įvertinama vidinė struktūra. Vidinė struktūra tiksliausiai atspindima antros eilės (tūrinių elementų) modeliu. Tačiau dėl ribotų skaičiavimo išteklių tokio modelio analizė nėra galima. Todėl kaip atskaitos modelis parenkamas pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelis. Siekiama gauti tokį pat sferos greičio kitimą taikant homogeninės medžiagos modelį. Skirtumas tarp sferos, veikiančios atskaitos ir homogeninės medžiagos modelių plokšteles, greičių pokyčių vertinamas dydžiu Δ :

$$\Delta = \left| \frac{c_h - c_b}{c_0 - c_b} \right| \cdot 100 \% ; \quad (75)$$

čia c_h , c_b – sferos greičiai po kontakto atitinkamai su homogeninės medžiagos ir atskaitos modeliu, c_0 – pradinis sferos greitis (440 m/s).

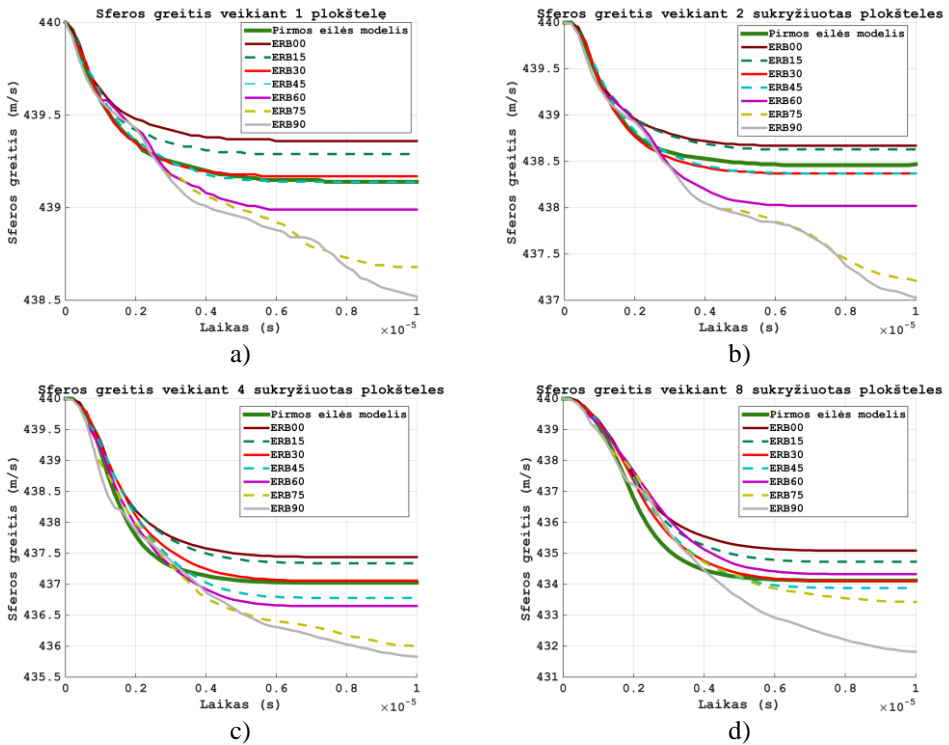
Homogeninės ortotropinės medžiagos kevalo elementų modeliai su medžiagos tiesiniais tamprumo ir stiprumo parametrais, gautais analizuojant pirmos (dvimačių elementų) bei antros eilės (tūrinių elementų) modelio reprezentatyvius elementus (pateiktus 3.3 ir 3.5 lentelėse), ir ESD vertėmis (3.7 lentelėje), taikomi siekiant patikrinti, ar tinkamas ESD vertės parinkimo kriterijus, kai modeliuojamas smūginis sferos poveikis kompozito sluoksniams. Kevalo elementams taikomas vienas integravimo taškas per storį.

Baigtinių elementų programoje LS-DYNA kontaktui tarp sferos bei plokštelių ir kontaktui tarp gretimų plokštelių aprašyti taikomas *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE kontakto tipas, kada kontaktuojantys paviršiai yra atnaujinami skaičiavimų metu (įvertinamas dėl elementų ištrynimo pasikeitęs kontaktuojantis paviršius). Homogeninės medžiagos plokštelių kraštuose pridodama sritis su 10 kartų didesnėmis ESD vertėmis. Atskaitos modelio kraštuose matricos medžiagos nutrūkimo deformacija 10, gijų medžiagos – 1000 kartų didesnė nei vidinėje modelio dalyje (taikomas toks pat medžiagos deformacijų didinimas, kaip ir aplinkinėje srityje nustatinėjant parametrus). Nutrūkimo deformacijos padidinamos tam, kad elementai nesuirtų dėl kraštuose visiškai įtvirtintų mazgų susidarančio lenkimo įtakos (įtvirtinami visi kraštinių mazgų laisvės laipsniai – ir poslinkiai, ir posūkiai).

Pagal sferos greičio pokytį homogeninės medžiagos modeliai gali būti suskirstyti į tris grupes. Pirmoji grupė atitinka modelius, kuriuose gijų medžiaga suyra kur kas anksčiau nei matricos medžiaga. Tokie modeliai yra pernelyg trapūs, kad atitiktų kompozito elgseną – elementai ištrinami anksčiau, nei pasiekiamas jų stiprumas įvairiomis kryptimis. Dėl kontakto su šiais modeliais sferos greičio pokytis daugiau nei 10 % mažesnis už sferos greičio pokytį, gautą dėl kontakto su atskaitos modeliu. Antrajai grupei priskiriami modeliai, su kuriais kontaktą patiriančios sferos greičio pokytis skiriasi mažiau nei 10 % nuo greičio pokyčio, gauto dėl sferos kontakto su atskaitos modeliu. Trečios grupės modeliai yra kur kas stipresni už kitus nagrinėtus modelius, elementai ištrinami vėliau, nei pasiekiamas jų stiprumas. Dėl kontakto su trečios grupės modeliais sferos greičio pokytis daugiau nei 10 % didesnis už apskaičiuotą sferos greičio pokytį dėl kontakto su atskaitos modeliu.

Sferos greičio kitimas dėl kontakto su homogeninės medžiagos modeliais, kurių parametrai apskaičiuoti iš pirmos eilės vienkrypčio kompozito modelio (*B* tipo), pateikti 3.16 pav., o 3.10 lentelėje – greičio vertės laiko momentu $1E - 5$ s ir

skirtumo įverčiai Δ . Pagal taikomą modelių skirstymą į grupes pirmosios grupės modeliams (trapiems) priklauso modeliai ERB00, ERB15. Šiems modeliams sferos greičio pokytis visais keturiais atvejais daugiau nei 10 % mažesnis už sferos greitį, gautą dėl kontakto su atskaitos modeliu. Antrajai grupei priklauso modeliai ERB30 ir ERB45, kuriuos tiriant sferos greičio pokyčio skirtumas visais nagrinėtais atvejais neviršijo 10 %. Nors 8 sukryžiuotų plokštelių atveju modelį ERB60 reikėtų priskirti antrajai grupei, kitais trimis atvejais jo sferos greičio pokytis nuo apskaičiuoto dėl kontakto su atskaitos modeliu skyrėsi daugiau nei 10 %. Todėl trečiajai grupei priskiriami modeliai ERB60, ERB75, ERB90. Be to, modelius ERB75 ir ERB90 veikiančios sferos greitis nėra nusistovėjęs paskutiniame nagrinėjamu laiko momentu. Vadinas, elementai modeliuose panaikinami per vėlavai, ir šiems modeliams suteikiamas per didelis stiprumas.



3.16 pav. Sferos greičio kitimas, kai sfera veikia vieną plokštelę (a) ir dvi (b), keturias (c) arba aštuonias (d) sukryžiuotas plokšteles, aprašomas pirmos eilės vienkrypčio kompozito modeliu arba homogeninės medžiagos modeliais su ESD vertėmis, apskaičiuotomis atitinkamu kampu pasuktam medžiagos reprezentatyviajam elementui

3.10 lentelė. Plokštelių kontakto su sfera rezultatai (c – sferos greitis) laiko momentu $1E - 5$ s

Modelis	Veikiamų plokštelių skaičius							
	1		2		4		8	
	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$
Atskaitos modelis	439,1365		438,4659		437,0240		434,1152	
ERB00	439,3640	26,3	438,6676	13,1	437,4437	14,1	435,0898	16,6
ERB15	439,2886	17,6	438,6271	10,5	437,3448	10,8	434,7279	10,4
ERB30	439,1721	4,1	438,3683	6,4	437,0609	1,2	434,1118	0,1
ERB45	439,1422	0,7	438,3742	6,0	436,7832	8,1	433,8842	3,9
ERB60	438,9916	16,8	438,0205	29,0	436,6490	12,6	434,3341	3,7
ERB75	438,6819	52,7	437,2126	81,7	435,9959	34,6	433,4261	11,7
ERB90	438,5220	71,2	437,0315	93,5	435,8288	40,2	431,8190	39,0

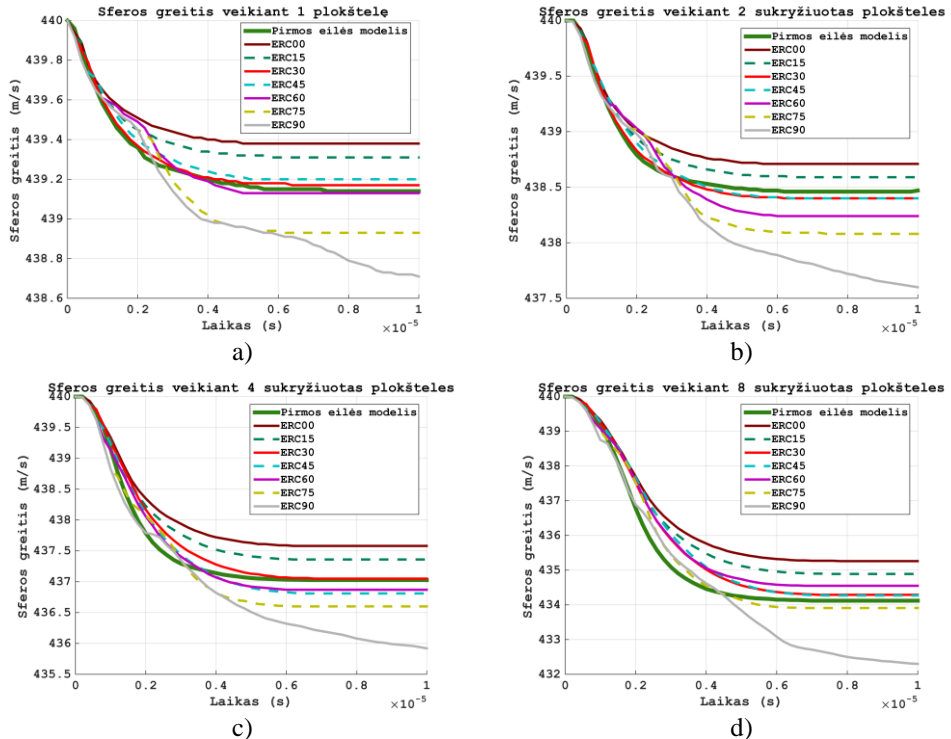
3.11 lentelėje pateiktos plokštelių kontakto su sfera skaičiavimų trukmės pirmos eilės atskaitos modeliui ir homogeninės medžiagos modeliams, kurių parametrai įvertinti iš pirmos eilės modelio. Modelių ERB75, ERB90 efektyviųjų suirimo deformacijų vertės nustatytos pagal matricos medžiagos valdomus modelius ir yra kur kas didesnės nei kitiems modeliams. Didelės efektyviosios suirimo deformacijos lemia, kad elementai išsigimsta, todėl mažinamas laiko žingsnis – skaičiavimai trunka gerokai ilgiau. Be to, elementai modelyje išlieka ilgiau – reikia vertinti daugiau kontakto sąlygų. Vis dėlto homogeninės medžiagos modeliams skaičiavimai neviršija valandos net 8 plokštelių atveju.

3.11 lentelė. Plokštelių kontakto su sfera skaičiavimo trukmės (val:min:s)

Modelis	Veikiamų plokštelių skaičius			
	1	2	4	8
Atskaitos modelis	02:17:41	04:38:22	09:49:35	22:35:24
ERB00	00:00:06	00:00:10	00:00:46	00:02:35
ERB15	00:00:05	00:00:09	00:00:48	00:02:32
ERB30	00:00:06	00:00:10	00:00:47	00:02:32
ERB45	00:00:08	00:00:13	00:00:47	00:02:37
ERB60	00:00:11	00:00:20	00:01:26	00:03:54
ERB75	00:00:41	00:01:04	00:02:52	00:05:31
ERB90	00:00:52	00:01:16	00:05:45	00:29:41

Sferos greičio kitimas dėl kontakto su homogeninės medžiagos modeliais, kurių parametrai apskaičiuoti iš antros eilės vienkrypčio kompozito modelio (C tipo), pateikti 3.17 pav., o 3.12 lentelėje – greičio vertės laiko momentu $1E - 5$ s ir skirtumo įverčiai Δ . Kaip ir B tipo modelių atveju, modeliai skirstomi į tris grupes. Pirmajai grupei su per maža elementų ištrynimo deformacija priskiriami modeliai ERC00 ir ERC15. Antrajai grupei priklauso modeliai ERC30, ERC45, ERC60, trečiajai – ERC75 ir ERC90. Modelį ERC90 veikiančios sferos greitis nėra nusistovėjęs paskutiniu nagrinėjamu laiko momentu, nors greičio pokytis nuo gauto dėl kontakto su atskaitos modeliu skiriasi daugiau kaip 30 %. Be to, toks homogeninės

medžiagos modelių grupavimas netinka sferos kontakto su dviem ir aštuoniomis plokštelėmis modeliams. Sferos kontakto su dviem sukryžiuotomis plokštelėmis atveju modelį ERC15 veikiančios sferos greitis nuo sferos, veikiančios atskaitos modelį, greičio skiriasi mažiau nei 10 %, ir šis modelis turėtų būti priskirtas antrai grupei, o ERC60 veikiančios sferos greitis nuo sferos, veikiančios atskaitos modelį, greičio skiriasi daugiau nei 10 %, ir šis modelis turėtų būti priskirtas trečiajai grupei. Sferos kontakto su aštuoniomis sukryžiuotomis plokštelėmis atveju modelis ERC75 turėtų būti priskirtas antrajai grupei.



3.17 pav. Sferos greičio kitimas, kai sfera veikia vieną plokštelę (a) ir dvi (b), keturias (c) arba aštuonias (d) sukryžiuotas plokšteles, aprašomas pirmos eilės vienkrypčio kompozito modeliu arba homogeninės medžiagos modeliais su ESD vertėmis, apskaičiuotomis atitinkamam kampui pasuktam medžiagos reprezentatyviajam elementui

3.12 lentelė. Plokštelių kontakto su sfera rezultatai (c – sferos greitis) laiko momentu $1E - 5$ s

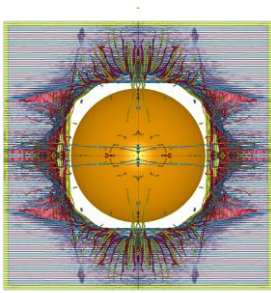
Modelis	Veikiamų plokštelių skaičius							
	1		2		4		8	
	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$	$c, m/s$	$\Delta, \%$
Atskaitos modelis	439,1365		438,4659		437,0240		434,1152	
ERC00	439,3592	27,9	438,7080	15,7	437,6347	18,7	435,3365	19,5
ERC15	439,2902	20,5	438,5978	8,4	437,3708	11,1	434,9797	13,2
ERC30	439,1766	4,5	438,3665	4,2	437,0216	1,0	434,2022	2,9
ERC45	439,1993	6,8	438,3939	4,1	436,8546	7,3	434,2651	2,6
ERC60	439,0548	0,2	438,1760	14,7	436,8746	5,1	434,4142	7,4
ERC75	438,8651	23,6	437,5923	24,9	436,2274	14,3	433,4958	3,6
ERC90	438,6123	48,9	437,3271	56,5	435,6144	37,0	432,0421	30,8

3.13 lentelėje pateiktos plokštelių kontakto su sfera skaičiavimų trukmės pirmos eilės atskaitos modeliui ir homogeninės medžiagos modeliams, kurių parametrai apskaičiuoti pagal antros eilės modelį. Kaip ir B modelių atveju, C modelių skaičiavimų trukmės gerokai padidėja, jeigu efektyvioji suirimo deformacija buvo apskaičiuota modeliams, kuriuose gijos suyra anksčiau nei matricos medžiaga (ERC60, ERC75, ERC90). Tačiau ir 8 plokštelių atveju skaičiavimų trukmė neviršija valandos.

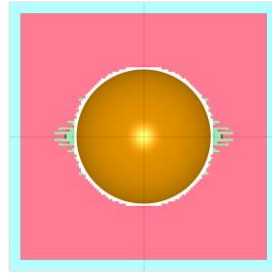
3.13 lentelė. Plokštelių kontakto su sfera skaičiavimo trukmė (val:min:s)

Modelis	Veikiamų plokštelių skaičius			
	1	2	4	8
Atskaitos modelis	02:17:41	04:38:22	09:49:35	22:35:24
ERC00	00:00:05	00:00:09	00:00:43	00:00:28
ERC15	00:00:05	00:00:10	00:00:45	00:02:33
ERC30	00:00:05	00:00:10	00:00:44	00:02:29
ERC45	00:00:06	00:00:12	00:00:48	00:02:40
ERC60	00:00:45	00:00:55	00:02:00	00:05:26
ERC75	00:00:26	00:01:14	00:06:23	00:05:01
ERC90	00:00:21	00:01:08	00:04:38	00:27:36

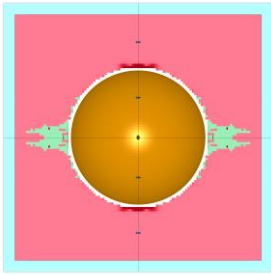
Pagrindinis skirtumas tarp B ir C tipo modelių grupavimo – B tipo modelis su ESD verte, apskaičiuota 60° kampu pasuktai struktūrai, priskiriamas trečios grupės modeliams, o C tipo modelis – antros grupės modeliams. Be to, C tipo modeliams sferos greitis nagrinėjamu laikotarpiu nenusistovi tik modeliui, atitinkančiam 90° kampu pasuktą struktūrą, kuriam dirbtinai buvo priskirta didelė ESD vertė.



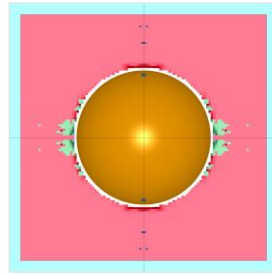
a)



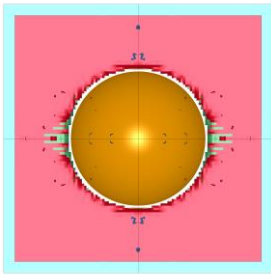
b)



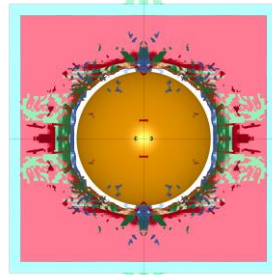
c)



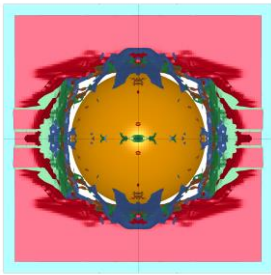
d)



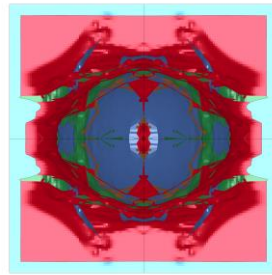
e)



f)



g)



h)

3.18 pav. Pirmos eilės (a) ir homogeninės medžiagos su skirtingomis ESD reikšmėmis (ERC00 (b), ERC15 (c), ERC30 (d), ERC45 (e), ERC60 (f), ERC75 (g), ERC90 (h)) keturių sukryžiuotų plokštelių modelių, veikiamų sferos, vaizdai iš apačios laiko momentu $t = 1E - 5s$

3.18 pav. vaizduojamas sferos (ruda) veikiamų kompozito plokštelių vaizdas iš apačios keturių sukryžiuotų plokštelių kompozito *C* tipo modeliams su skirtingomis maksimalios nutrūkimo deformacijos vertėmis. Kiekvienas medžiagos sluoksnis (ar sudedamosios medžiagos atskaitos modelio atveju) 3.18 pav. vaizduojamas kita spalva. Pakraščiuose esanti apatinio sluoksnio sritis (mėlyna spalva homogeninės medžiagos modeliams, geltona ir žalia – atskaitos modeliui) atitinka elementus su didesnėmis suirimo deformacijomis taip išvengiant suirimo dėl visiškai įtvirtintų kraštinių mazgų įtakos. Nors ERC45 ir ERC60 modelių atveju sferos greičių pokyčių skirtumas mažesnis nei 2 %, ERC60 modelio plokštelės vaizdas yra panašesnis į atskaitos modelio vaizdą, nes suyra ne tik su sfera kontaktuojantys elementai, bet ir aplinkiniai elementai gijų kryptimi. Akivaizdu, kad modelių ERC75 ir ERC90 maksimalios nutrūkimo deformacijos yra per didelės, nes, nors ir stebimas kai kurių elementų panaikinimas gijų kryptimi, lieka didelė dalis elementų kontakto su sfera zonoje.

Skaitiniuose eksperimentuose sfera dėl kontakto su storiausiu – 8 plokštelių – modeliu praranda mažiau nei 2 % greičio. Bet iš daugiau plokštelių sudaryto atskaitos modelio nagrinėjimas ribojamas dėl skaičiavimo įrangos.

Kaip ESD įvertį siūloma taikyti didžiausią efektyviosios deformacijos vertę, apskaičiuotą modeliams, kuriuose gijos suyra anksčiau nei matricos medžiaga. Skaitiniuose eksperimentuose *B* tipo modelių atveju ši kriterijų atitinka 60° kampu, *C* tipo – 45° kampu pasuktos medžiagos fragmentas. *B* tipo modeliams toks kriterijaus parinkimas nėra tinkamas, nes tiriant sferos greičio pokytį dėl kontakto su atskaitos modeliu artimiausias pokytis stebimas atveju modelio, kurio ESD vertė skaičiuojama iš 45° kampu pasukto modelio. *C* tipo modeliams nurodytas kriterijus tinkamas, jeigu išskeliama papildoma sąlyga, kad visais nagrinėjimais atvejais sferos greičio pokytis nuo apskaičiuoto dėl kontakto su atskaitos modeliu skirtųsi mažiau kaip 10 %.

Tam, kad būtų gaunamas tikslesnis posūkio kampas ESD įverčiui apskaičiuoti, turėtų būti analizuojami modeliai, pasukti įvairiais kampais režiuose tarp 45° ir 60°. Reikia atkreipti dėmesį, kad ESD vertės skaičiuojamos laiko momentu prieš gijų suirimą, o tai gali paankstinti homogeninės medžiagos elementų ištrynimą iš modelio. Kad būtų išvengta išankstinio elementų ištrynimo, galima įvesti pataisos koeficientus ESD vertėms, kuriais vertės būtų padidintos nustatytu absoliučioju ar santykinu dydžiu. ESD įverčių, apskaičiuotų pirmaisiais laiko momentais po gijų suirimo, naudoti negalima dėl dinaminių efektų, kurie lemia staigų deformacijų pokytį.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

Skaitiniuose eksperimentuose nagrinėjamas vienkrypčio kompozito, pagaminto iš ilgų aramido gijų mažo tankio polietileno matricoje, pavyzdys. Remiantis skaitinio modeliavimo rezultatais suformuluotos išvados.

1. Tiesiniai parametrai, apskaičiuoti baigtinių elementų metodu sukuriant nepriklausomas deformacijas su kraštinėmis sąlygomis, kai šlyties deformacijoms nekeliama tiesių sienų sąlyga, yra artimi tiesiniams parametrams, gautiems, kai struktūrai suteikiamos grynosios deformacijos (išlaikomos tiesios sienos šlyties deformacijai), bet parametrai skaičiuojami tik pagal vidurinio elemento įtempius ir deformacijas. Parametrų įverčiai, apskaičiuoti su

- pirmosiomis kraštinėmis sąlygomis, nuo įverčių, gautų asimptotinio homogenizavimo metodu, skiriasi mažiau nei 5 % tarp tos pačios eilės modelių. Analitiniai įverčiai artimiausi pirmos eilės modelių įverčiams, kai vertinama tik gijų kryptis ir sudedamųjų medžiagų dalys modelyje, todėl gali būti taikomi tik grubiam kompozito tamprumo parametrų įvertinimui.
2. Jeigu tiesinių parametrų nustatymui taikomos kraštinės sąlygos, kai nekeliama tiesių sienų sąlyga šlyties deformacijoms, nagrinėjamo reprezentatyviojo elemento forma (skirtingi stačiakampio gretasienio kraštinių ilgiai) įtakos parametrų neturi, jei išlaikomas nagrinėjamos struktūros periodiškumas.
 3. Vienkrypčio kompozito stiprumo ribas siūloma vertinti maksimalių įtempių kriterijumi iš kreivių, gaunamų sukuriant didėjančias deformacijas. Pirmos eilės modelio atveju reprezentatyvusis elementas gijoms statmenos ir šlyties deformacijų atvejais stiprumo vertės pasiekia esant kur kas didesnėms deformacijoms nei antros eilės modelis.
 4. Buvo atlikti modelių, kurių medžiagos koordinacių sistema su globaliąja koordinacių sistema sudaro įvairius kampus, tempimo globaliąja ašimi skaitiniai eksperimentai. Nustatyta, kad pirmos eilės modelių atveju ESD vertė turėtų būti apskaičiuojama iš 60° , antros – iš 45° kampu pasukto modelio. Šie modelis įgyja didžiausią ESD reikšmę iš visų nagrinėtų atitinkamos eilės modelių, kuriuose gijos tempiant globaliosios koordinacių sistemos X ašimi suyra anksčiau nei matricos medžiaga. Didesniu kampu pasuktiems modeliams ESD vertė smarkiai išauga. Tam, kad būtų gaunama tikslesnė ESD vertė, reikia papildomai nagrinėti modelius, kurių gijų ir globaliosios koordinacių sistemos kampas yra tarp 45° ir 60° .
 5. Iš atliktos absoliučiai kietos sferos, kurios pradinis greitis 440 m/s, ir kompozito plokštelių kontakto skaitinių eksperimentų, modelius su skirtingomis ESD vertėmis galima padalyti į tris grupes. Pirmoje grupėje ESD vertės yra per mažos ir elementai ištrinami per anksti (nustatyti iš modelių su mažu posūkio kampu). Kompozito modeliuose, kuriems ESD vertė nustatyta iš modelių su dideliu posūkio kampu (artėjančiu prie 90°), elementai ištrinami per vėlai ir sfera yra stabdoma per stipriai lyginant su pirmos eilės kompozito modeliu. Pagal skaitinius rezultatus, atsižvelgiant į nagrinėjamų plokštelių skaičių modelyje, geriausia taikyti ESD vertes, apskaičiuotas reprezentatyvioms sritims, kurių gijos su globaliąja koordinacių sistema sudaro $30\text{--}60^\circ$ kampus.
 6. ESD vertė priklauso nuo medžiagos vidinės struktūros, sudedamųjų medžiagų parametrų. Tam, kad ESD vertė būtų parinkta tinkamai, reikia įvertinti ir stambioje skalėje dominuojančios apkrovos tipą. Jei jėgos veikia kompozito plokštumoje ir žinomas kampas, kurį sudaro kompozitą veikianti jėga su pagrindinėmis medžiagos ašimis, ESD nustatymui pakanka nagrinėti tokiu pat kampu pasuktą reprezentatyvią sritį. Bendruoju atveju elementą veikiančios jėgos gali būti sudėtinės, veikti ne tik kompozito plokštumoje, todėl ESD reikšmė turi būti kiek galima universalesnė.

4. TAIKYMAS (EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI)

4.1. Mikrostruktūros įtaka trimačio (3D) spausdintuvo gaminio stiprumui

4.1.1. Daugiaskalis modelis

Tyrime siekiama nustatyti trimačiu (3D) spausdintuvu išliejamo sluoksnio storio įtaką gaminio mechaninėms savybėms. Spausdinimo proceso metu gaminyje susidaro sudėtinga nevientisa vidinė struktūra, kurioje yra oro tarpai, persidengimai tame pačiame sluoksnyje arba tarp kelių sluoksnių. Nagrinėti bandiniai spausdinti viena kryptimi, todėl tokią struktūrą galima vadinti vienkrypčiu kompozitu – pagaminta medžiaga yra ortotropinė, tačiau jos savybes reikia nustatyti remiantis žiniomis apie vidinę struktūrą. Tikslūs pradinės medžiagos parametrai nėra žinomi, be to, jie gali pakisti spausdinimo metu dėl temperatūros poveikio. Todėl darbo tikslas buvo tirti vidinės struktūros įtaką gaminio stiprumui, apibrėžiamam maksimaliais pasiekiamais įtempiais.

Sudaromas dviskalis modelis, kurio smulkiausioje skalėje nagrinėjamas sluoksnio storį atitinkantis reprezentatyvusis elementas, kuriuo įvertinami liekantys tarpai tarp liejamos medžiagos sluoksnių arba gretimose spausdinimo linijose išpiltos medžiagos tame pačiame sluoksnyje. Smulkiausioje skalėje baigtinių elementų programa LS-DYNA taikomas izotropinės medžiagos modelis *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, aprašomas Jungo moduliu, Puasono koeficientu, takumo riba, tangentiniu moduliu ir efektyviąja nutrūkimo deformacija, kurią pasiekęs elementas ištrinamas.

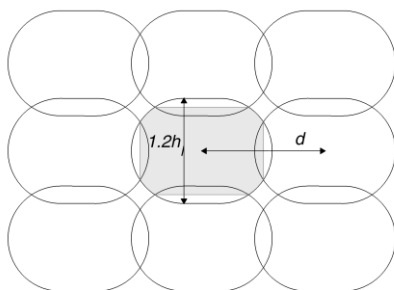
Stambiausioje (makro) skalėje nagrinėjama gaminio elgsena tempimo ir trijų taškų lenkimo testų metu. Šioje skalėje baigtinių elementų programa LS-DYNA taikomas ortotropinės medžiagos modelis *MAT_NONLINEAR_ORTHOTROPIC, apibrėžiamas tiesiniais tamprumo parametrais ir nominaliųjų įtempių–deformacijų kreivėmis. Bandymuose taikomas mažo greičio poveikis, todėl dinaminiai efektai nebuvo nagrinėjami ir skaičiuojant taikoma kvazistatinė analizė.

4.1.2. Mikroskalės modelis

Trimačių (3D) detalių spausdinimo procesas (pagrindo bei medžiagos kaitinimo temperatūra, purkštuko galvutės judėjimo koordinatės bei greičiai, ventiliatoriaus veikimas ir t. t.) valdomas G-kodu. Atlikus G-kodo, sugeneruoto programa *Slic3r*, analizę kiekvienam nagrinėjamam sluoksnio storiui (0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,35 mm, 0,4 mm) sukurtas reprezentatyvusis elementas. Tiesiame kelyje išpilamos medžiagos skerspjūvis aproksimuojamas stačiakampiu užapvalintais galais (4.1 pav.). Kad modelyje būtų užtikrintas persidengimas tarp sluoksnių ir tarp medžiagos, išpiltos gretimose linijose, sluoksnio storis padidinamas 20 %. Korekcijos koeficientas parenkamas taip, kad pagal G-kodą išpiltas medžiagos tūris ir teorinis tūris, apskaičiuotas stačiakampio gretasienio skerspjūvio gijoms su įvertintu persidengimu (pilka sritis 4.1 pav.) skirtųsi mažiau kaip 5 % tempimo ir lenkimo bandiniams. Teorinis tūris V apskaičiuojamas pagal formulę:

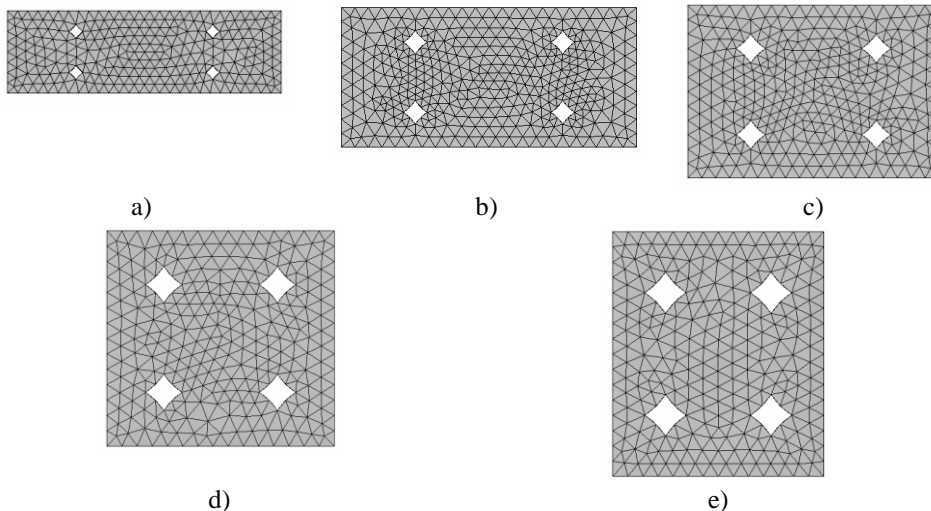
$$V = \left((d - h_l)h_l + \left(\beta \frac{h_l}{2}\right)^2 \left(\pi - 2 \left(2 \operatorname{acos} \left(\frac{1}{\beta} \right) - \sin \left(2 \operatorname{acos} \left(\frac{1}{\beta} \right) \right) \right) \right) \right) L; \quad (76)$$

čia d – atstumas tarp gretimų gijų centrų, h_l – sluoksnio storis, L – gijos ilgis, β – nežinomas korekcijos koeficientas. Optimalios parametro β reikšmės gali būti randamos tik konkrečiam atvejui. Todėl atliekant G-kodo analizę teorinis tūris buvo skaičiuojamas β reikšmėms: 1; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,25; 1,3; 1,35. Vienintelė iš nagrinėtų reikšmių, su kuria skerspjūviui apskaičiuotas tūris buvo pakankamai artimas (skyrėsi ne daugiau nei 5 %) pagal G-kodą išpiltam tūriui (vertinami bandiniai tempimo ir lenkimo testams), buvo $\beta = 1,2$ (priedas A).



4.1 pav. Gretimų gijų skerspjūvio modelis mikroskalėje (h_l – sluoksnio storis, d – atstumas tarp dviejų gretimų gijų centrų)

Atstumas tarp gretimose linijose išpiltos medžiagos centrų d lygus atstumui, kuriuo pasilenka spausdintuvo galvutė, pereidama į gretimą spausdinimo liniją. Sluoksnio storį atitinkantis reprezentatyvusis elementas sudaromas iš vieno pilnos spausdinimo linijos skerspjūvio, apsupto po pusę gretimų spausdinimo linijų tame pačiame sluoksnyje ir gretimuose sluoksniuose skerspjūvių. Plonesniems sluoksniams tas pats išpilamos medžiagos tūris paskleidžiamas plačiau, todėl reprezentatyvieji modeliai nėra kubo formos (4.2 pav.).



4.2 pav. Reprerzentatyviųjų elementų, atitinkančių sluoksnio storius $h_l = 0,2$ mm (a), $h_l = 0,25$ mm (b), $h_l = 0,3$ mm (c), $h_l = 0,35$ mm (d), $h_l = 0,4$ mm (e), skerspjūviai mikroskalėje

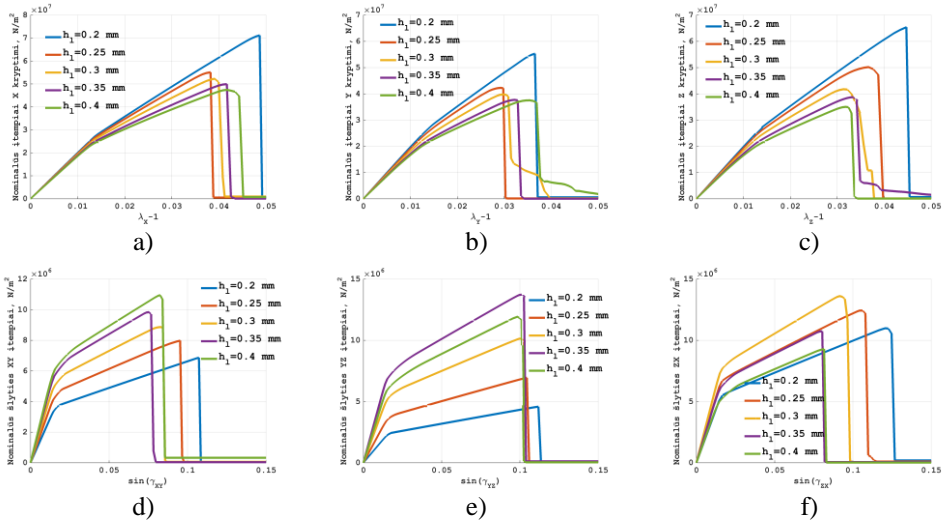
Skaitiniuose eksperimentuose taikomi medžiagos parametrai, pateikti 4.1 lentelėje. Pagal 2.7 pav. pavaizduotas schemas tiesiškai didinant poslinkius δ su reprezentatyviuoju elementu atliekama kvazistatinė analizė. Ašinėms apkrovoms deformacijos skaičiuojamos kaip $\lambda - 1$; čia λ – elemento ilgių tempimo ašimi nagrinėjamu momentu ir pradiniu momentu santykis. Šlyties apkrovoms nominalios deformacijos apibrėžiamos kaip $\sin(\gamma)$; čia γ – šlyties kampas. Reprerzentatyvieji elementai nagrinėjami su prielaida, kad spausdinimo kryptis sutampa su X ašimi, sluoksnio storio kryptis atitinka Z ašį.

4.1 lentelė. Mikromodelio medžiagos savybės.

Jungo modulis, N/m ²	2,9E+009
Puasono koeficientas	0,32
Takumo riba, N/m ²	3E+007
Tangentinis modulis, N/m ²	5E+008
Efektyvioji nutrūkimo deformacija	0,07

Kreivės, gautos atlikus reprezentatyviųjų elementų analizę, pateikiamos 4.3 pav. Akivaizdu, kad apskaičiuoti įtempimų–deformacijų ryšiai priklauso nuo elemento sluoksnio storio. Ploniausią sluoksnį atitinkantys reprezentatyvieji elementai pasiekia aukščiausias ašinių įtempimų ir deformacijų vertes (4.3 pav., a), b), c)), bet šlyties stiprumas sluoksnyje (XY plokštuma) yra didesnis elementams, kuriais aprašoma vidinė storų sluoksnių struktūra (4.3 pav., d). Šlyties stiprumas YZ plokštumoje didžiausias modeliams su 0,35 mm sluoksnio storiumi (4.3 pav., e), kai išliejamos medžiagos skerspjūvis artimas skrituliui. Šlyties stiprumas ZX plokštumoje didžiausias modeliams, atitinkantiems 0,3 mm sluoksnio storį, o maksimalios

įtempimų kreivių vertės pasiekiamos esant didesnėms deformacijoms modeliuose su plonesniais sluoksniais (4.3 pav., f).



4.3 pav. Nominaliosios įtempimų–deformacijų kreivės (išilginė (a), skersinė pagal Y ir Z ašis (b, c), šlyties XY (d), YZ (e), ZX (f) plokštumose), taikomos makroskalėje tūrinių elementų *MAT_NONLINEAR_ORTHOTROPIC medžiagos modeliui

4.1.3. Eksperimentiniai ir skaitiniai bandymai makroskalėje

Pagrindiniai bandymai, taikomi medžiagos savybėms nustatyti – tempimo ir trijų taškų lenkimo. Tempimo bandymas atliekamas pasirinktų sluoksnio storių bandiniams su išilgine spausdinimo kryptimi. Lenkimo bandymas buvo nagrinėtas bandiniams ir su skersine, ir su išilgine spausdinimo kryptimi. Kiekvienoje grupėje naudojant tą patį G-kodą buvo atspausdinti 5 bandiniai. Tačiau 2 tempimo bandiniai iš grupės su 0,4 mm sluoksnio storiu buvo sugadinti eksperimentų metu, ir jų rezultatai negalėjo būti panaudojami analizei. Nors eksperimentiniams bandiniams spausdinimo linijos galuose (išilginės spausdinimo krypties bandiniams) arba šonuose (skersinės spausdinimo krypties bandiniams) yra statmenos pagrindinei spausdinimo krypčiai, skaitiniuose eksperimentuose naudojamas supaprastintas modelis su prielaida, kad spausdinimo kryptis yra vienoda visame bandinyje.

Bandiniai eksperimentiniams tyrimams buvo spausdinami iš PLA (polilaktinės rūgšties) spausdintuvu *Prusa i3* su spausdinimo parametrais, pateiktais 4.2 lentelėje.

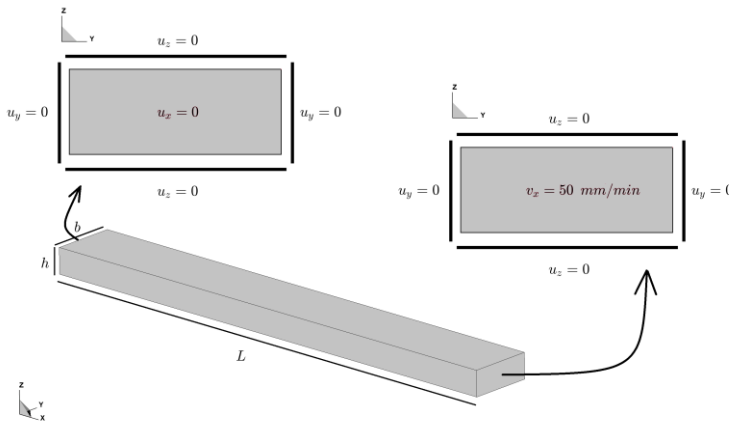
4.2 lentelė. Spausdinimo proceso parametrai

Spausdinimo greitis, mm/s	80
Spausdinimo greitis pirmam sluoksniui, mm/s	30
Purkštuko temperatūra, °C	200
Pagrindo temperatūra, °C	55
Gijos skersmuo, mm	1,75
Išpilamos medžiagos daugiklis	1

Eksperimentiniai tempimo ir trijų taškų lenkimo bandymai buvo atliekami bandymų mašina *TINIUS Olsen H25KT*, kurios išeities rezultatas – veikianti jėga (N) ir poslinkis (mm). Kiekvieno bandinio storis ir plotis matuojamas trijuose taškuose. Storio ir pločio vidutinės vertės vėliau taikomos įtempių skaičiavimui $\bar{\sigma} = \frac{F}{bh}$ tempimo bandyme ir $\hat{\sigma} = \frac{3 \cdot F \cdot Ls}{2 \cdot b \cdot h^2}$ lenkimo bandyme, čia b ir h – bandinio plotis ir storis, Ls – atstumas tarp remiančių cilindrų centrų, F – struktūrą veikianti jėga. Iš kiekvienos bandinių grupės rezultatų atrenkama būdingoji kreivė, mažiausiai nutolusi nuo vidutinės grupės kreivės mažiausių kvadratų metodo prasme.

Tempimo bandymai su plastikais ir plastiko kompozitais paprastai atliekami pagal ISO 527 standartą. Tačiau tokio standarto bandinio forma (angl. *dog-bone shape*) nėra tinkama, nes apvalūs perėjimai nuo siauros dalies prie platesnės gali sukelti pirmalaikį nutrūkimą [113]. Todėl eksperimentiniuose tyrimuose naudojamas stačiakampis gretasienis, kurio matavimai 150 mm × 10 mm × 4 mm. Bandinys tempiamas 50 mm/min greičiu.

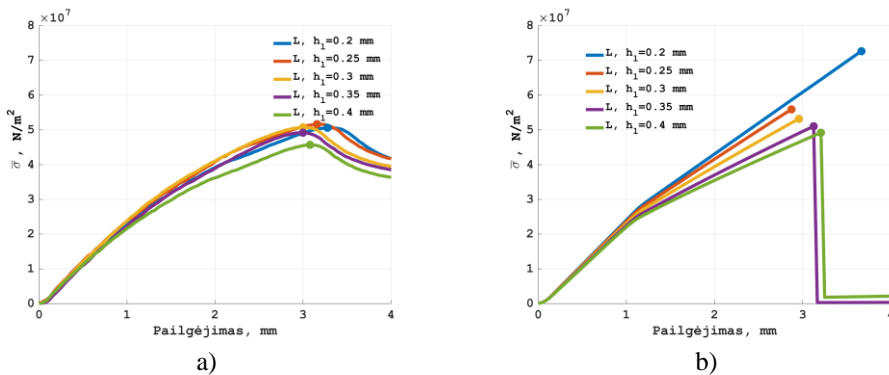
Tempimo bandymo skaitiniam eksperimentui atlikti sukuriamas $L = 80$ mm, $b = 10$ mm, $h = 4$ mm matmenų tūrinių baigtinių elementų modelis (4.4 pav.), kuriuo aprašoma bandinio dalis tarp spaustuvų, kai spausdinimo kryptis – išilgai ilgosios kraštinės. Modelio kraštinės sąlygos pavaizduotos 4.4 pav. – viena modelio siena tempiama, priešinga jai įtvirtinta tempimo kryptimi. Tempiamos ir priešingos jai sienos kraštinės papildomai įtvirtintos Y ir Z kryptimis. Bandinys tempiamas lėtai, todėl nepatiria dinaminių efektų ir skaičiavimams taikoma kvazistatinė neišreikštinė analizė baigtinių elementų programa LS-DYNA, kai laiko komponentė nurodo ne laiką, o apkrovos dalį. Jėgos F , taikomos $\bar{\sigma}$ skaičiuoti, vertė gaunama viduriniame bandinio skerspjūvyje, statmename jėgos veikimo kryptčiai.



4.4 pav. Baigtinių elementų modelis tempimo bandymui (u_x, u_y, u_z – atitinkamos kraštinės ar sienos poslinkiai, v_x – sienos greitis X ašies kryptimi)

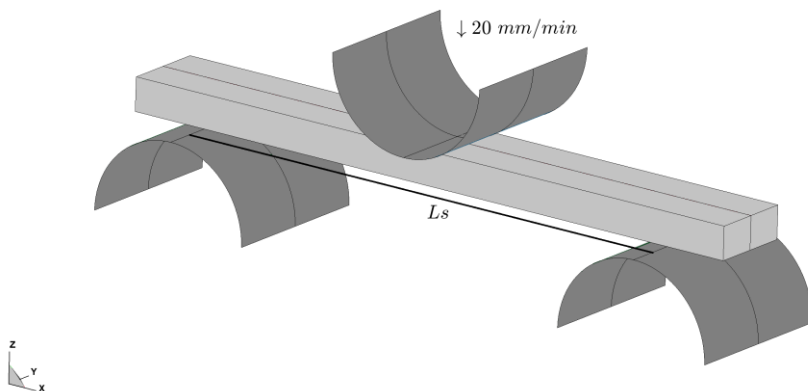
Skaitiniai rezultatai rodo, kad didžiausia $\bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}_{max}$) vertė turėtų būti pasiekta bandiniams su ploniausiu sluoksnio storiumi (4.5 pav., b). $\bar{\sigma}_{max}$ vertės mažesnės modeliams, atitinkantiems storesnio sluoksnio reprezentatyvius elementus. Skaitiniai modelių, atitinkančių 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm sluoksnio storius, tempimo

eksperimentai buvo nutraukti anksčiau, nei pasiekta maksimali pailgėjimo reikšmė, nes staigus pokytis medžiagos nominaliųjų įtempių–deformacijų kreivėse lėmė makromodelio nestabilumą. Eksperimentiniuose rezultatuose didžiausia $\bar{\sigma}_{max}$ vertė pasiekama bandinių grupei su 0,25 mm sluoksnio storiu (4.5 pav., a), mažiausia – modeliams su storiausiu sluoksniu. Visose grupėse, išskyrus storiausio sluoksnio, $\bar{\sigma}_{max}$ vertės nuo vidutinės skyrėsi mažiau nei 5 %. Storiausio sluoksnio grupės bandinių kreivių sklaida buvo kur kas didesnė nei kitų grupių, nes medžiaga pilama didesniu greičiu ir jos sukibimas tarp gretimose linijose išpiltos medžiagos tame pačiame sluoksnyje bei tarp gretimų sluoksnių yra prastas. Ir atliekant eksperimentus, ir skaitinio modeliavimo atveju didžiausias pailgėjimas atitinkamoms $\bar{\sigma}_{max}$ vertėms buvo stebimas bandiniuose su ploniausiu sluoksniu. Tempimo bandymą lemia gijų elgsena, todėl skaitinių eksperimentų rezultatai yra artimi iš mikromodelio gautoms įtempių–deformacijų kreivėms gijų kryptimi su atitinkamu sluoksnio storiu.



4.5 pav. Būdingosios tempimo testo $\bar{\sigma}$ ir poslinkių kreivės, gautos eksperimentiškai (a) ir atlikus skaitinius eksperimentus (b), kur kiekvienai kreivei pažymėta maksimali pasiekta reikšmė

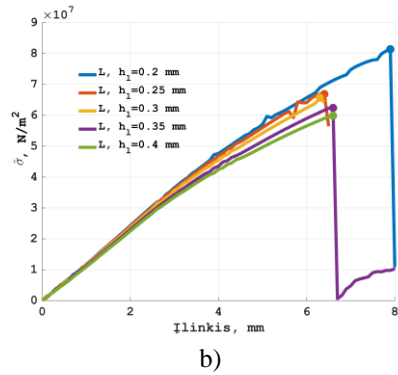
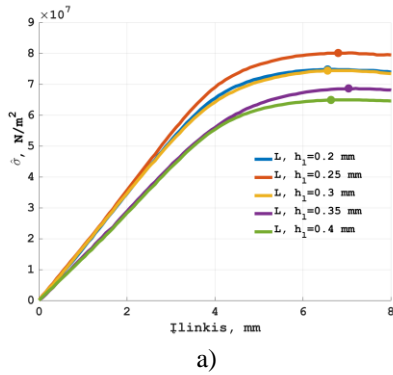
Trijų taškų lenkimo bandymas (ISO 178) atliekamas lenkimo standumui nustatyti, kai bandinio matavimai $L = 80$ mm, $b = 10$ mm, $h = 4$ mm, o tarpas tarp remiančių cilindų centrų $L_s = 63$ mm, lenkiantis cilindras bandinį veikia centre. Lenkimo bandymo schema pavaizduota 4.6 pav. Maksimalus galimas įlinkis – 18 mm. Eksperimentų metu bandinys buvo padėtas taip, kad sluoksnis, išspausdintas paskutinis, būtų viršuje. Lenkimo bandymas buvo atliktas su dvių tipų bandiniais. Pirmojo tipo bandinių spausdinimo kryptis buvo išilgai ilgosios kraštinės, antrojo – skersai.



4.6 pav. Baigtinių elementų modelis trijų taškų lenkimo bandymui

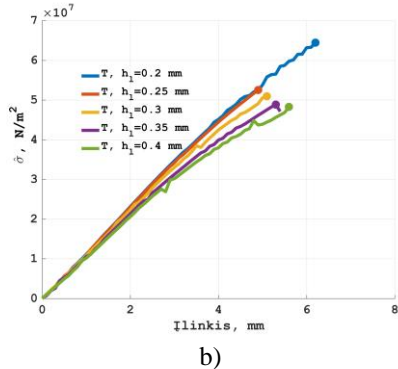
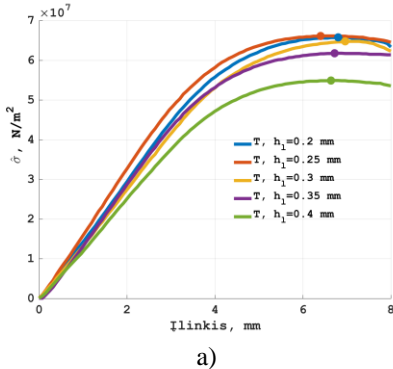
Skaitiniuose lenkimo eksperimentuose dėl simetriškumo skaičiavimai atliekami pusei baigtinių elementų modelio. Remiantys ir veikiantis cilindrai sudaryti iš absoliučiai kietos medžiagos (*MAT_RIGID) kevalo elementų, o kiekvieno cilindro skersmuo – 10 mm. Viršutinis cilindras leidžiasi į apačią 20 mm/min greičiu. Kaip ir tempimo bandyme, dinaminių efektų nėra, todėl skaičiavimams taikoma kvazistatinė neišreikštinė analizė baigtinių elementų programa LS-DYNA. Skaičiavimai gali būti nutraukiami anksčiau, nei numatyta, jeigu nepasiekama pusiausvyra ir negalima rasti sprendinio. Dėl staigaus kritimo medžiagos modelio aprašyme taikomose kreivėse trijų taškų lenkimo bandymo skaitinis eksperimentas tampa nestabilus, jei pasiekiamas kritimo taškas. Kontaktui tarp cilindrų ir tūrinių elementų modelio taikomas *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE kontakto tipas. Jėgos F , kurios reikia, kad viršutinis cilindras judėtų pagal nurodytą dėsnį, dydis taikomas $\hat{\sigma}$ skaičiavimui.

Išilginės spausdinimo krypties tipo bandiniams skaitiniuose eksperimentuose didžiausia $\hat{\sigma}_{max}$ vertė gaunama bandiniams su ploniausiu sluoksniu, bet tai prieštarauja eksperimentiniams rezultatams, kai stipriausias buvo bandinys su 0,25 mm sluoksnio storio (4.7 pav.). Tokie rezultatai gali būti gaunami dėl to, kad sukibimas tarp medžiagos gretimose spausdinimo linijose yra prastas, o tai nebuvo įvertinta baigtinių elementų modelyje. Kitų sluoksnio storio bandiniams eksperimentinės $\hat{\sigma}$ – įlinkių kreivės buvo išsidėsčiusios ta pačia tvarka, kaip ir skaitinės analizės rezultatuose. Nors skaitiniai eksperimentai buvo nutraukiami dėl atsiradusio modelio nestabilumo, tariama, kad $\hat{\sigma}_{max}$ vertė buvo pasiekta iki skaičiavimų sustabdymo. Be to, skaitiniai modeliai yra kur kas silpnesni. Pavyzdžiui, kai įlinkis lygus 2 mm, skaitinių modelių $\hat{\sigma}$ vertės yra ~20–33 % procentais mažesnės už eksperimentines.



4.7 pav. Būdingosios trijų taškų lenkimo testo $\hat{\sigma}$ ir poslinkių kreivės, gautos eksperimentiškai (a) ir atlikus skaitinius eksperimentus (b) išilginės spausdinimo krypties bandiniams; kiekvienoje kreivėje pažymėta maksimali pasiekta reikšmė

Skersinės spausdinimo krypties tipo bandinių atveju eksperimentinės bandinių su sluoksnio storiais 0,2 mm ir 0,25 mm $\hat{\sigma}_{max}$ vertės skyrėsi nežymiai. Tendencija, kad $\hat{\sigma}_{max}$ vertės yra didesnės bandiniuose su plonesniu sluoksniu, išlaikoma ir skersinės spausdinimo krypties tipo bandiniams tiek eksperimentų, tiek skaitinės analizės kreivėse (4.8 pav.). Kaip ir išilginės spausdinimo krypties bandinių atveju, skaitiniai modeliai yra kur kas silpnesni nei eksperimentiniai bandiniai – kai įlinkis lygus 2 mm, skaitinių modelių $\hat{\sigma}$ vertės yra ~19–30 % mažesnės už eksperimentines $\hat{\sigma}$ vertes.



4.8 pav. Būdingosios trijų taškų lenkimo testo $\hat{\sigma}_{max}$ ir poslinkių kreivės, gautos eksperimentiškai (a) ir atlikus skaitinius eksperimentus (b) su skersinės spausdinimo krypties bandiniais; kiekvienoje kreivėje pažymėta maksimali pasiekta reikšmė

Išilginės spausdinimo krypties tipo bandiniuose buvo gautos didesnės $\hat{\sigma}_{max}$ vertės ir jos įgytos esant didesniai įlinkiui nei skersinės spausdinimo krypties bandinių.

Pagal skaitinių eksperimentų baigtinių elementų metodu gautas kreives ir lenkiant, ir tempiant stipriausi yra ploniausio sluoksnio bandiniai, tačiau toks teiginys prieštarauja eksperimentiniams rezultatams, kai stipriausi buvo 0,25 mm sluoksnio storio bandiniai. Skaitinių ir eksperimentinių rezultatų neatitikimas gali būti gautas dėl bandinių gamybos metu nepakankamai gerai paskleistos medžiagos ir

neužtikrinamo sukibimo tarp medžiagos gretimose to paties sluoksnio spausdinimo linijose bei grubios medžiagos modelio aproksimacijos, taikomos atliekant skaitinius eksperimentus.

Tempimo bandinių skerspjūvių, išilginės ir skersinės spausdinimo krypties lenkimo bandinių lenkimo zonų po atliktų eksperimentų nuotraukos pateikiamos *B* priede.

4.2. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Sudarytas dviejų dalių modelis trimačiu (3D) spausdintuvu pagamintai struktūrai modeliuoti, kurio smulkiausioje skalėje įvertinamas medžiagos heterogeniškumas, o stambioje daroma prielaida, kad medžiaga homogeninė ortotropinė.
2. Atlikus sugeneruotą trimatį (3D) spausdintuvą valdančio G-kodo analizę sukurti penki skirtingus sluoksnio storius atitinkantys reprezentatyvieji elementai, pagal kuriuos nustatytos medžiagos kreivės taikomos lenkimo ir tempimo bandymų skaitiniams eksperimentams. Nustatyta, kad nepakanka išpilamos gijos nagrinėti kaip stačiakampio užapvalintais galais, nes nėra užtikrinamas persidengimas tarp gijų tame pačiame ir gretimuose sluoksniuose. Todėl įvedamas korekcijos (persidengimo) koeficientas, išplečiantis gijos skerspjūvį.
3. Dėl tiksliai nežinomų fizikiniams eksperimentams naudojamoms medžiagos parametrų, mikromodelyje taikomos grubios PLA įtempių–deformacijų ryšio aproksimacijos skaitiniais eksperimentais nepavyksta atkartoti fizikinių eksperimentų bei modeliuoti medžiagos elgsenos po to, kai buvo pasiekta maksimali įtempių vertė. Be to, pagal sudarytus mikromodelius neįvertinamas medžiagos netolygumas (susilpnėjimas), atsiradęs dėl persidengimų sluoksnyje ar tarp sluoksnių.
4. Fizikinių ir skaitinių eksperimentų tempimo bei lenkimo bandymų rezultatai atitinka (bandinių su skirtingais sluoksnio storiais kreivės išsidėsto ta pačia tvarka) nagrinėtuose sluoksnio storio režimuose, išskyrus kraštinius atvejus, kai fizikinių eksperimentų bandiniuose nėra užtikrinamas sukibimas tarp sluoksnių arba tarp gretimų spausdinimo linijų tame pačiame sluoksnyje.

5. BENDROSIOS IŠVADOS

Sukurta daugiaskalis skaitinis modelis lanksčių vienkrypčių kompozitų analizei. Atlikus teorinius tyrimus ir skaitinius eksperimentus suformuluotos išvados.

1. Darbe sudaryti dviejų skalių skaitiniai modeliai vienkrypčio kompozito tyrimui. Smulkiroje skalėje vienkrypčio kompozito parametrų nustatymui iš reprezentatyviojo elemento taikomi du išsamumo lygiai – sudaromi pirmos (dvimačių elementų) ir antros eilės (tūrinių elementų) kompozito modeliai. Stambioje skalėje homogeninės medžiagos modelis sudaromas iš kevalo elementų. Pagal skirtingų eilių modelius nustatyti parametrai gijų kryptimi skiriasi mažiau nei 10 %, statmenomis kryptimis – daugiau nei 10 %. Todėl kompozito struktūros analizėje svarbu tinkamai parinkti smulčiausios skalės išsamumo lygį.
2. Apibrėžtos reprezentatyvios srities modelio kraštinės sąlygos tiesinių, stiprumo ir suirimo parametrų nustatymui smulkiroje skalėje.
 - 2.1. Tiesiniai tamprumo parametrai gali būti vertinami iš reprezentatyviojo modelio, kuriam sukurtos grynosios deformacijos (šlyties deformacijos atveju nereikalaujant, kad kraštinės po deformacijos išliktų tiesios), analizės.
 - 2.2. Ašiniai netiesiniai parametrai įvertinami sukuriant grynąsias ašines deformacijas su didėjančiais poslinkiais. Šlyties stiprumui nustatyti modelis turi būti papildytas aplinkinės srities elementais su kur kas didesnėmis ištyrinimo deformacijomis išvengiant ankstyvo kampinių mazgų ištyrinimo.
 - 2.3. Suirimo parametrų nustatymui taikomi pasuktų medžiagos fragmentų modeliai, patalpinti į aplinkinę sritį su kur kas didesnėmis deformacijomis. Šiems modeliams sukuriama grynosios deformacijos, kai poslinkiai nurodomi tempiamai ir šoninėms sienoms, taip išvengiant įtempimų koncentracijos reprezentatyvios srities viduje.
3. Iš kompozito plokštelių ašinių tempimo eksperimentų stambioje skalėje nustatyta, kad šiems testams tiesiniai tamprumo, stiprumo parametrai ir suirimo kriterijui taikoma deformacijos vertė parinkta tinkamai (pirmos eilės modeliams – iš modelių, pasuktų 60° , antros eilės – iš modelių, pasuktų 45° kampu), nes modeliai atitinka atskaitos modelio elgseną.
4. Iš absoliučiai kietos sferos kontakto su kompozito plokštelėmis skaitinių eksperimentų nustatyta, kad geriausiai sferos greičio kitimą dėl kontakto su atskaitos modeliu atitinka modeliai, kurių ištyrinimo deformacija apskaičiuojama 45° kampu pasuktam medžiagos fragmentui.
5. Eksperimentiškai nustatyta, kad skaitinis trimačiu (3D) spausdintuvu pagaminto objekto modeliavimas atitinka eksperimentinius rezultatus iki maksimalios įtempimų ribos vidutinio sluoksnio storio objektams, kurių atveju užtikrinamas tinkamas gretimų gijų susiliejimas eksperimentiniuose gaminiuose.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

1. GEISER, Juergen. *Multicomponent and Multiscale Systems*. Springer International Publishing, 2016. ISBN 9783319151168.
2. PINHO-DA-CRUZ, J., OLIVEIRA, J. A. and TEIXEIRA-DIAS, F. Asymptotic homogenisation in linear elasticity. Part I: Mathematical formulation and finite element modelling. *Computational Materials Science*. 2009. Vol. 45, no. 4, p. 1073–1080. DOI 10.1016/j.commatsci.2009.02.025.
3. XIA, Zihui, ZHANG, Yunfa and ELLYIN, Fernand. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40, no. 8, p. 1907–1921. DOI 10.1016/S0020-7683(03)00024-6.
4. KAW, Autar K. *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. CRC Press, 2005. ISBN 0849313430.
5. MATTHEWS, FI, DAVIES, Gao, HITCHINGS, D and SOUTIS, C. *Finite element modelling of composite materials and structures*. CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-0846-1.
6. ANSAR, Mahmood, XINWEI, Wang and CHOUWEI, Zhou. Modeling strategies of 3D woven composites: A review. *Composite Structures*. 2011. Vol. 93, no. 8, p. 1947–1963. DOI 10.1016/j.compstruct.2011.03.010.
7. CARTA, Giorgio, BRUN, Michele and BALDI, Antonio. Design of a porous material with isotropic negative Poisson's ratio. *Mechanics of Materials*. 2016. Vol. 97, p. 67–75. DOI 10.1016/j.mechmat.2016.02.012.
8. WANG, Yuanlong, WANG, Liangmo, MA, Zheng-dong and WANG, Tao. A negative Poisson's ratio suspension jounce bumper. *Jmade*. 2016. Vol. 103, p. 90–99. DOI 10.1016/j.matdes.2016.04.041.
9. M'SAOUBI, Rachid, AXINTE, Dragos, SOO, Sein Leung, NOBEL, Christoph, ATTIA, Helmi, KAPPEMEYER, Gregor, ENGIN, Serafettin and SIM, Wei-Ming. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 64, no. 2, p. 557–580. DOI 10.1016/j.cirp.2015.05.002.
10. DAS, H.N. and KAPURIA, S. On the use of bend–twist coupling in full-scale composite marine propellers for improving hydrodynamic performance. *Journal of Fluids and Structures*. 2016. Vol. 61, p. 132–153. DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2015.11.008.
11. DI BELLA, G., CALABRESE, L. and BORSELLINO, C. Mechanical characterisation of a glass/polyester sandwich structure for marine applications. *Materials and Design*. 2012. Vol. 42, p. 486–494. DOI 10.1016/j.matdes.2012.06.023.
12. MANIN, Lionel, POGGI, Marc and HAVARD, Nicolas. Vibrations of table tennis racket composite wood blades: Modeling and experiments. *Procedia*

- Engineering*. 2012. Vol. 34, p. 694–699. DOI 10.1016/j.proeng.2012.04.118.
13. KULKARNI, S. G., GAO, X. L., HORNER, S. E., ZHENG, J. Q. and DAVID, N. V. Ballistic helmets - Their design, materials, and performance against traumatic brain injury. *Composite Structures*. 2013. Vol. 101, p. 313–331. DOI 10.1016/j.compstruct.2013.02.014.
 14. LI, X.G., GAO, X.-L. and KLEIVEN, S. Behind helmet blunt trauma induced by ballistic impact: a computational model. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 91, p. 56–67. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.010.
 15. SAPOZHNIKOV, S. B., KUDRYAVTSEV, O. A. and ZHIKHAREV, M. V. Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 81, p. 8–16. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2015.03.004.
 16. BARAUSKAS, Rimantas and ABRAITIENE, Ausra. Multi-resolution finite element models for simulation of the ballistic impact on non-crimped composite fabric packages. *Composite Structures*. 2013. Vol. 104, p. 215–229. DOI 10.1016/j.compstruct.2013.04.014.
 17. BASHA, Rubaiya Yunus, SAMPATH KUMAR, T.S. and DOBLE, Mukesh. Design of biocomposite materials for bone tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 57, p. 452–463. DOI 10.1016/j.msec.2015.07.016.
 18. RAMAKRISHNA, S., MAYER, J., WINTERMANTEL, E. and LEONG, Kam W. Biomedical applications of polymer-composite materials: A review. *Composites Science and Technology*. 2001. Vol. 61, no. 9, p. 1189–1224. DOI 10.1016/S0266-3538(00)00241-4.
 19. CAMPBELL, F. C. Chapter 1: Introduction to Composite Materials. In : *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. 2010. p. 30.
 20. VASILIEV, V.V. and MOROZOV, E.V. *Advanced mechanics of composite materials*. Elsevier Science, 2007. ISBN 0080453724.
 21. ZHANG, Daxu and HAYHURST, D. R. Stress-strain and fracture behaviour of 0°/90° and plain weave ceramic matrix composites from tow multi-axial properties. *International Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47, no. 21, p. 2958–2969. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2010.06.023.
 22. MASOUDI-NEJAD, Ali, BIDKHORI, Gholamreza, HOSSEINI ASHTIANI, Saman, NAJAFI, Ali, BOZORGMEHR, Joseph H. and WANG, Edwin. Cancer systems biology and modeling: Microscopic scale and multiscale approaches. *Seminars in Cancer Biology*. 2015. Vol. 30, p. 60–69. DOI 10.1016/j.semcancer.2014.03.003.
 23. WANG, Xiaofei, NEELY, Andrew J., MCILWAINE, Gawn G. and LUECK, Christian J. Multi-scale analysis of optic chiasm compression by finite element modelling. *Journal of Biomechanics*. 2014. Vol. 47, no. 10, p. 2292–

2299. DOI 10.1016/j.jbiomech.2014.04.040.
24. BOGDANOVICH, A. E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites. *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41, no. 20, p. 6547–6590. DOI 10.1007/s10853-006-0197-2.
 25. INGRAM, G. D., CAMERON, I. T. and HANGOS, K. M. Classification and analysis of integrating frameworks in multiscale modelling. *Chemical Engineering Science*. 2004. Vol. 59, no. 11, p. 2171–2187. DOI 10.1016/j.ces.2004.02.010.
 26. SOUZA, F. V., ALLEN, D. H. and KIM, Y. R. Multiscale model for predicting damage evolution in composites due to impact loading. *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68, no. 13, p. 2624–2634. DOI 10.1016/j.compscitech.2008.04.043.
 27. KOMEILI, M. and MILANI, A.S. The effect of meso-level uncertainties on the mechanical response of woven fabric composites under axial loading. *Computers and Structures*. 2012. Vol. 90-91, no. 1, p. 163–171. DOI 10.1016/j.compstruc.2011.09.001.
 28. CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, R. Multi-scale evaluation of the linear elastic and failure parameters of the unidirectional laminated textiles with application to transverse impact simulation. *Composite Structures*. 2016. Vol. 142, p. 325–334. DOI 10.1016/j.compstruct.2016.01.104.
 29. BARAUSKAS, Rimantas and ABRAITIENE, Aušra. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34, p. 1286–1305. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.002.
 30. NILAKANTAN, Gaurav, KEEFE, Michael, BOGETTI, Travis A. and GILLESPIE, John W. Multiscale modeling of the impact of textile fabrics based on hybrid element analysis. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. Vol. 37, no. 10, p. 1056–1071. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.007.
 31. ZHANG, Chao, BINIENDA, Wieslaw K., GOLDBERG, Robert K. and KOHLMAN, Lee W. Meso-scale failure modeling of single layer triaxial braided composite using finite element method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 58, p. 36–46. DOI 10.1016/j.compositesa.2013.11.009.
 32. OTERO, F., MARTINEZ, X., OLLER, S. and SALOMÓN, O. An efficient multi-scale method for non-linear analysis of composite structures. *Composite Structures*. 2015. Vol. 131, p. 707–719. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.06.006.
 33. ALIAN, A.R., KUNDALWAL, S.I. and MEGUID, S.A. Multiscale modeling of carbon nanotube epoxy composites. *Polymer*. 2015. Vol. 70, p. 149–160. DOI 10.1016/j.polymer.2015.06.004.

34. KAMINSKI, Marcin. Multiscale homogenization of n-component composites with semi-elliptical random interface defects. *International Journal of Solids and Structures*. 2005. Vol. 42, no. 11-12, p. 3571–3590. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2004.11.001.
35. MORTAZAVI, Bohayra, HASSOUNA, Fatima, LAACHACHI, Abdelghani, RAJABPOUR, Ali, AHZI, Said, CHAPRON, David, TONIAZZO, Valerie and RUCH, David. Experimental and multiscale modeling of thermal conductivity and elastic properties of PLA/expanded graphite polymer nanocomposites. *Thermochimica Acta*. 2013. Vol. 552, p. 106–113. DOI 10.1016/j.tca.2012.11.017.
36. XIGUANG, Gao, YINGDONG, Song, ZHIGANG, Sun and XUTENG, Hu. Numerical simulation of dynamic response of fiber reinforced ceramic matrix composite beam with matrix cracks using multiscale modeling. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010. Vol. 23, no. 5, p. 537–548. DOI 10.1016/S1000-9361(09)60252-1.
37. ZHANG, Y. X. and ZHANG, H. S. Multiscale finite element modeling of failure process of composite laminates. *Composite Structures*. 2010. Vol. 92, no. 9, p. 2159–2165. DOI 10.1016/j.compstruct.2009.09.031.
38. OLIVEIRA, J. A., PINHO-DA-CRUZ, J. and TEIXEIRA-DIAS, F. Asymptotic homogenisation in linear elasticity. Part II: Finite element procedures and multiscale applications. *Computational Materials Science*. 2009. Vol. 45, no. 4, p. 1081–1096. DOI 10.1016/j.commatsci.2009.01.027.
39. CALNERYTE, D. Evaluation of Elasticity Parameters for Heterogeneous Material with Periodic Microstructure. In : *Information and Software Technologies. 18th International Conference, ICIST 2012, Kaunas, Lithuania, September 13-14, 2012. Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 1–7.
40. PELISSOU, C., BACCOU, J., MONERIE, Y. and PERALES, F. Determination of the size of the representative volume element for random quasi-brittle composites. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. Vol. 46, no. 14-15, p. 2842–2855. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2009.03.015.
41. KANIT, T., FOREST, S., GALLIET, I., MOUNOURY, V. and JEULIN, D. Determination of the size of the representative volume element for random composites: Statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40, p. 3647–3679. DOI 10.1016/S0020-7683(03)00143-4.
42. OSTOJA-STARZEWSKI, M. Random field models of heterogeneous materials. *International Journal of Solids and Structures*. 1998. Vol. 35, no. 19, p. 2429–2455. DOI 10.1016/S0020-7683(97)00144-3.
43. BERGER, Harald, KARI, Sreedhar, GABBERT, Ulrich, RODRIGUEZ-RAMOS, Reinaldo, GUINOVART, Raul, OTERO, Jose A. and BRAVO-

- CASTILLERO, Julian. An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites. *International Journal of Solids and Structures*. 2005. Vol. 42, p. 5692–5714. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.016.
44. THIBAUX, P., CHASTEL, Y. and CHAZE, A.-M. Finite element simulation of a two-phase viscoplastic material: calculation of the mechanical behaviour. *Computational Materials Science*. 2000. Vol. 18, p. 118–125. DOI 10.1016/S0927-0256(00)00092-6.
45. SEARLES, K., ODEGARD, G. and KUMOSA, M. Micro- and mesomechanics of 8-harness satin woven fabric composites: I - Evaluation of elastic behavior. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001. Vol. 32, no. 11, p. 1627–1655. DOI 10.1016/S1359-835X(00)00181-0.
46. JIN, K.-K., YUANCHEN, Huang, LEE, Y.-H. and SUNG, Kyu Ha. Distribution of Micro Stresses and Interfacial Traction in Unidirectional Composites. *Journal of Composite Materials*. 2008. Vol. 42, no. 18, p. 1825–1849. DOI 10.1177/0021998308093909.
47. DRAGO, Anthony and PINDERA, Marek Jerzy. Micro-macromechanical analysis of heterogeneous materials: Macroscopically homogeneous vs periodic microstructures. *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67, no. 6, p. 1243–1263. DOI 10.1016/j.compscitech.2006.02.031.
48. SUN, C.T. and VAIDYA, R.S. Prediction of composite properties from a representative volume element. *Composites Science and Technology*. January 1996. Vol. 56, no. 2, p. 171–179. DOI 10.1016/0266-3538(95)00141-7.
49. YOUNES, Rafic, HALLAL, Ali, FARDOUN, Farouk and CHEHADE, Fadi Hajj. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials. In : HU, Ning (ed.), *InTech*. 2012.
50. SCHMITZ, A. and HORST, P. A finite element unit-cell method for homogenised mechanical properties of heterogeneous plates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 61, p. 23–32. DOI 10.1016/j.compositesa.2014.01.014.
51. LI, Shuguang. Boundary conditions for unit cells from periodic microstructures and their implications. *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68, no. 9, p. 1962–1974. DOI 10.1016/j.compscitech.2007.03.035.
52. GIGLIOTTI, L. and PINHO, S.T. Exploiting symmetries in solid-to-shell homogenization, with application to periodic pin-reinforced sandwich structures. *Composite Structures*. 2015. Vol. 132, p. 995–1005. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.06.062.
53. ZHANG, Boming, YANG, Zhong, SUN, Xinyang and TANG, Zhanwen. A virtual experimental approach to estimate composite mechanical properties: Modeling with an explicit finite element method. *Computational Materials Science*. 2010. Vol. 49, no. 3, p. 645–651.

- DOI 10.1016/j.commat.2010.06.007.
54. ZHANG, Chao and BINIENDA, Wieslaw K. A meso-scale finite element model for simulating free-edge effect in carbon/epoxy textile composite. *Mechanics of Materials*. 2014. Vol. 76, p. 1–19. DOI 10.1016/j.mechmat.2014.05.002.
 55. GREEN, S.D., MATVEEV, M.Y., LONG, A.C., IVANOV, D. and HALLETT, S.R. Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry. *Composite Structures*. 2014. Vol. 118, p. 284–293. DOI 10.1016/j.compstruct.2014.07.005.
 56. MEDEIROS, Ricardo De, MORENO, Mariano Eduardo, MARQUES, Flávio Donizeti and TITA, Volnei. Effective properties evaluation for smart composite materials. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012. Vol. 34, p. 362–370. DOI 10.1590/S1678-58782012000500004.
 57. FERREIRA, Rafael T L, RODRIGUES, Helder C., GUEDES, José M. and HERNANDES, José A. Hierarchical optimization of laminated fiber reinforced composites. *Composite Structures*. 2014. Vol. 107, no. 1, p. 246–259. DOI 10.1016/j.compstruct.2013.07.051.
 58. MUSTAFA, Ghulam, SULEMAN, Afzal and CRAWFORD, Curran. Probabilistic micromechanical analysis of composite material stiffness properties for a wind turbine blade. *Composite Structures*. 2015. Vol. 131, p. 905–916. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.06.070.
 59. ENAB, Tawakol A. Evaluation of the Effective Electromechanical Properties of Unidirectional Piezocomposites Using Different Representative Volume Elements. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2015. Vol. 15, no. 2, p. 21–29.
 60. LI, S. General unit cells for micromechanical analyses of unidirectional composites. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001. Vol. 32, no. 6, p. 815–826. DOI 10.1016/S1359-835X(00)00182-2.
 61. QING, Hai and MISHNAEVSKY, Leon. Unidirectional high fiber content composites: Automatic 3D FE model generation and damage simulation. *Computational Materials Science*. 2009. Vol. 47, no. 2, p. 548–555. DOI 10.1016/j.commat.2009.09.023.
 62. PINDERA, M. J. and BEDNARCYK, Brett A. An efficient implementation of the generalized method of cells for unidirectional, multi-phased composites with complex microstructures. *Composites Part B: Engineering*. 1999. Vol. 30, p. 87–105. DOI 10.1016/S1359-8368(98)00040-7.
 63. ZHU, Xiaojun, CHEN, Xuefeng, ZHAI, Zhi, YANG, Zhibo, LI, Xiang and HE, Zhengjia. Strain rate dependent deformation of a polymer matrix composite with different microstructures subjected to off-axis loading. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014.

DOI 10.1155/2014/590787.

64. OGIERMAN, W and KOKOT, G. Mean field homogenization in multi- scale modelling of composite materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2013. Vol. 61, no. 2, p. 343–348.
65. HU, Z. and KARKI, R. Prediction of mechanical properties of three-dimensional fabric composites reinforced by transversely isotropic carbon fibers. *Journal of Composite Materials*. 2014. Vol. 49, no. 12, p. 1513–1524. DOI 10.1177/0021998314535960.
66. RODRÍGUEZ-RAMOS, R., GUINOVART-DÍAZ, R., LÓPEZ-REALPOZO, J. C., BRAVO-CASTILLERO, J., OTERO, J. A., SABINA, F. J. and LEBON, F. Effective properties of periodic fibrous electro-elastic composites with mechanic imperfect contact condition. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. Vol. 73, p. 1–13. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2013.03.011.
67. ANDREASSEN, E and ANDREASEN, Cs. How to determine composite material properties using numerical homogenization. *Computational Materials Science*. 2014. Vol. 83, p. 488–495.
68. CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, Rimantas. Modelling physical behaviour of the unidirectional composite materials with FEM using reduced data. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2014.
69. BARBERO, Ej. *Finite element analysis of composite materials*. Boca Raton, FL : CRC Press, 2008. ISBN 9781420054330.
70. CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, Rimantas. Two Scale Modeling of Heterogeneous Solid Body by Using Thick Shell Finite Elements. In : *Information and Software Technologies. 19th International Conference, ICIST 2013, Kaunas, Lithuania, October 2013. Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 322–333.
71. HASSAN, E. M., GEORGIADES, A. V., SAVI, M. A. and KALAMKAROV, A. L. Analytical and numerical analysis of 3D grid-reinforced orthotropic composite structures. *International Journal of Engineering Science*. 2011. Vol. 49, no. 7, p. 589–605. DOI 10.1016/j.ijengsci.2011.02.004.
72. BELLINI, Anna and GÜÇERİ, Selçuk. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2003. Vol. 9, no. 4, p. 252–264. DOI 10.1108/13552540310489631.
73. WANG, H. W., ZHOU, H. W., GUI, L. L., JI, H. W. and ZHANG, X. C. Analysis of effect of fiber orientation on Young’s modulus for unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014. Vol. 56, p. 733–739. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.09.020.
74. MAY, Michael, NOSSEK, Matthias, PETRINIC, Nik, HIERMAIER, Stefan and THOMA, Klaus. Adaptive multi-scale modeling of high velocity impact

- on composite panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 58, p. 56–64.
DOI 10.1016/j.compositesa.2013.11.015.
75. PAHLAVANPOUR, M., MOUSSADDY, H., GHOSSEIN, E., HUBERT, P. and LÉVESQUE, M. Prediction of elastic properties in polymer-clay nanocomposites: Analytical homogenization methods and 3D finite element modeling. *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 79, p. 206–215.
DOI 10.1016/j.commatsci.2013.06.029.
 76. MATZENMILLER, A., LUBLINER, J. and TAYLOR, R. L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. *Mechanics of Materials*. 1995. Vol. 20, no. 2, p. 125–152. DOI 10.1016/0167-6636(94)00053-0.
 77. RIBEIRO, Marcelo Leite, TITA, Volnei and VANDEPITTE, Dirk. A new damage model for composite laminates. *Composite Structures*. 2012. Vol. 94, no. 2, p. 635–642. DOI 10.1016/j.compstruct.2011.08.031.
 78. MAIMÍ, P., CAMANHO, P. P., MAYUGO, J. A. and DÁVILA, C. G. A continuum damage model for composite laminates: Part I - Constitutive model. *Mechanics of Materials*. 2007. Vol. 39, p. 897–908.
DOI 10.1016/j.mechmat.2007.03.005.
 79. BIENIAŚ, J., DĘBSKI, H., SUROWSKA, B. and SADOWSKI, T. Analysis of microstructure damage in carbon/epoxy composites using FEM. *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 64, p. 168–172.
DOI 10.1016/j.commatsci.2012.03.033.
 80. SANTIUSTE, Carlos, SOLDANI, Xavier and MIGUELEZ, Maria Henar. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. *Composite Structures*. 2010. Vol. 92, no. 3, p. 691–698.
DOI 10.1016/j.compstruct.2009.09.021.
 81. AGHDAM, M.M., PAVIER, M.J. and SMITH, D.J. Micro-mechanics of off-axis loading of metal matrix composites using finite element analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2001. Vol. 38, no. 22–23, p. 3905–3925. DOI 10.1016/S0020-7683(00)00248-1.
 82. ODEGARD, G. and KUMOSA, M. Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the Iosipescu and 10° off-axis shear tests. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, no. 16, p. 2917–2943. DOI 10.1016/S0266-3538(00)00141-X.
 83. MOROZOV, E. V. and VASILIEV, V. V. Determination of the shear modulus of orthotropic materials from off-axis tension tests. *Composite Structures*. 2003. Vol. 62, no. 3–4, p. 379–382.
DOI 10.1016/j.compstruct.2003.09.008.
 84. KANG, Huairong, SHAN, Zhongde, ZANG, Yong and LIU, Feng. Progressive damage analysis and strength properties of fiber-bar composites reinforced by three-dimensional weaving under uniaxial tension. *Composite*

- Structures*. 2016. Vol. 141, p. 264–281.
DOI 10.1016/j.compstruct.2016.01.050.
85. JIANG, Wu Gui, ZHONG, Ren Zhi, QIN, Qing H. and TONG, Yong Gang. Homogenized finite element analysis on effective elastoplastic mechanical behaviors of composite with imperfect interfaces. *International Journal of Molecular Sciences*. 2014. Vol. 15, no. 12, p. 23389–23407.
DOI 10.3390/ijms151223389.
 86. WAN, Yumin, SUN, Baozhong and GU, Bohong. Multi-scale structure modeling of damage behaviors of 3D orthogonal woven composite materials subject to quasi-static and high strain rate compressions. *Mechanics of Materials*. 2016. Vol. 94, p. 1–25. DOI 10.1016/j.mechmat.2015.11.012.
 87. ERNST, Gerald, VOGLER, Matthias, HÜHNE, Christian and ROLFES, Raimund. Multiscale progressive failure analysis of textile composites. *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70, no. 1, p. 61–72.
DOI 10.1016/j.compscitech.2009.09.006.
 88. CAPUTO, F., DE LUCA, A., LAMANNA, G., BORRELLI, R. and MERCURIO, U. Numerical study for the structural analysis of composite laminates subjected to low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*. 2014. Vol. 67, p. 296–302. DOI 10.1016/j.compositesb.2014.07.011.
 89. ZAKO, Masaru, UETSUJI, Yasutomo and KURASHIKI, Tetsusei. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials. *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63, no. 3, p. 507–516.
DOI 10.1016/S0266-3538(02)00211-7.
 90. SUN, C.T., QUINN, B.J., TAO, J., OPLINGER, D.W. and HUGHES, William J. Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates. In : *U.S. Department of Transportation Report*. 1996.
 91. RAO, G. Venu Gopala, MAHAJAN, Puneet and BHATNAGAR, Naresh. Three-dimensional macro-mechanical finite element model for machining of unidirectional-fiber reinforced polymer composites. *Materials Science and Engineering A*. 2008. Vol. 498, no. 1–2, p. 142–149.
DOI 10.1016/j.msea.2007.11.157.
 92. ZHENG, J. Y. and LIU, P. F. Elasto-plastic stress analysis and burst strength evaluation of Al-carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates. *Computational Materials Science*. 2008. Vol. 42, p. 453–461.
DOI 10.1016/j.commatsci.2007.09.011.
 93. LIU, P. F. and ZHENG, J. Y. Recent developments on damage modeling and finite element analysis for composite laminates: A review. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31, no. 8, p. 3825–3834.
DOI 10.1016/j.matdes.2010.03.031.
 94. STABILE, A. and LAURENZI, S. Coiling dynamic analysis of thin-walled composite deployable boom. *Composite Structures*. 2014. Vol. 113, no. 1,

- p. 429–436. DOI 10.1016/j.compstruct.2014.03.043.
95. LONG, Shuchang, YAO, Xiaohu and ZHANG, Xiaoqing. Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact. *Composite Structures*. 2015. Vol. 132, p. 290–298. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.05.037.
 96. SAFRI, S N A, SULTAN, M T H, YIDRIS, N and MUSTAPHA, F. Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials – A review. *The International Journal of Engineering and Science*. 2014. P. 50–60.
 97. HA-MINH, Cuong, KANIT, Toufik, BOUSSU, Fran??ois and IMAD, Abdellatif. Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact. *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50, no. 7, p. 2172–2184. DOI 10.1016/j.commatsci.2011.02.029.
 98. NILAKANTAN, Gaurav, KEEFE, Michael, WETZEL, Eric D., BOGETTI, Travis A. and GILLESPIE, John W. Computational modeling of the probabilistic impact response of flexible fabrics. *Composite Structures*. 2011. Vol. 93, no. 12, p. 3163–3174. DOI 10.1016/j.compstruct.2011.06.013.
 99. SUDHIR SASTRY, Y. B., BUDARAPU, Patabhi R., KRISHNA, Y. and DEVARAJ, S. Studies on ballistic impact of the composite panels. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 72, no. 1, p. 2–12. DOI 10.1016/j.tafmec.2014.07.010.
 100. LIM, C.T., SHIM, V.P.W. and NG, Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*. January 2003. Vol. 28, no. 1, p. 13–31. DOI 10.1016/S0734-743X(02)00031-3.
 101. TABIEI, Ala and AMINJIKARAI, S. Babu. A strain-rate dependent micro-mechanical model with progressive post-failure behavior for predicting impact response of unidirectional composite laminates. *Composite Structures*. 2009. Vol. 88, no. 1, p. 65–82. DOI 10.1016/j.compstruct.2008.02.017.
 102. GAMA, Bazle A. and GILLESPIE, John W. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38, no. 4, p. 181–197. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.001.
 103. ZHANG, G. M., BATRA, R. C. and ZHENG, J. Effect of frame size, frame type, and clamping pressure on the ballistic performance of soft body armor. *Composites Part B: Engineering*. 2008. Vol. 39, p. 476–489. DOI 10.1016/j.compositesb.2007.04.002.
 104. GOWER, H. L., CRONIN, D. S. and PLUMTREE, A. Ballistic impact response of laminated composite panels. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35, no. 9, p. 1000–1008. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.007.

105. YEN, Chian Fong. A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 46, p. 11–22. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2011.12.007.
106. PERNAS-SANCHEZ, J., ARTERO-GUERRERO, J. A., ZAHR VINUELA, J., VARAS, D. and LOPEZ-PUENTE, J. Numerical analysis of high velocity impacts on unidirectional laminates. *Composite Structures*. 2014. Vol. 107, p. 629–634. DOI 10.1016/j.compstruct.2013.08.035.
107. RIMAVICIUS, V., CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, R. Coupling of zones with different resolution capabilities in dynamic finite element models of woven composites. *Mechanika*. 2013. Vol. 19, no. 3. DOI 10.5755/j01.mech.19.3.4654.
108. LEE, C. S., KIM, S. G., KIM, H. J. and AHN, S. H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 187–188, p. 627–630. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095.
109. SOOD, Anoop Kumar, OHDAR, R.K. and MAHAPATRA, S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*. 2010. Vol. 31, no. 1, p. 287–295. DOI 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
110. WITTBRODT, Ben and PEARCE, Joshua M. The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components. *Additive Manufacturing*. 2015. Vol. 8, p. 110–116. DOI 10.1016/j.addma.2015.09.006.
111. MELENKA, Garrett W., SCHOFIELD, Jonathon S., DAWSON, Michael R. and CAREY, Jason P. Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer. *Rapid Prototyping Journal*. 2015. Vol. 21, no. 5, p. 618–627. DOI 10.1108/RPJ-09-2013-0093.
112. GURRALA, Pavan Kumar and REGALLA, Srinivasa Prakash. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. *Virtual and Physical Prototyping*. 2014. Vol. 9, no. 3, p. 141–149. DOI 10.1080/17452759.2014.913400.
113. AHN, Sung-Hoon, MONTERO, Michael, ODELL, Dan, ROUNDY, Shad and WRIGHT, Paul K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, no. 4, p. 248–257. DOI 10.1108/13552540210441166.
114. ES-SAID, O. S., FOYOS, J., NOORANI, R., MENDELSON, M., MARLOTH, R. and PREGGER, B. a. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Materials and Manufacturing Processes*. 2000. Vol. 15, no. 1, p. 107–122. DOI 10.1080/10426910008912976.
115. TORRADO PEREZ, Angel R., ROBERSON, David a. and WICKER, Ryan B. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-

- based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2014. Vol. 14, no. 3, p. 343–353. DOI 10.1007/s11668-014-9803-9.
116. RODRÍGUEZ, José F., THOMAS, James P. and RENAUD, John E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2003. Vol. 9, no. 4, p. 219–230. DOI 10.1108/13552540310489604.
 117. DOMINGO-ESPIN, Miquel, PUIGORIOL-FORCADA, Josep M., GARCIA-GRANADA, Andres-Amador, LLUMÀ, Jordi, BORROS, Salvador and REYES, Guillermo. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*. 2015. Vol. 83, p. 670–677. DOI 10.1016/j.matdes.2015.06.074.
 118. ZIENKIEWICZ, O. C. and TAYLOR, R. L. *The Finite Element Method*. 2005. ISBN 9780750663212.
 119. CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, Rimantas. Dynamic Analysis of 4-Node Degenerated Shell Element with Updated Thickness. In : *Information and Software Technologies. 21st International Conference, ICIST 2015, Druskininkai, Lithuania, October 15–16, 2015, Proceedings*. Springer International Publishing, 2015. p. 592–603.
 120. NGUYEN-VAN, H., MAI-DUY, N., TRAN-CONG, T. An improved quadrilateral flat element with drilling degrees of freedom for shell structural analysis. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2009. Vol. 49, no. 2, p. 81–110.
 121. FELIPPA, Ca and PARK, Kc. A direct flexibility method. *Computer methods in applied mechanics and ...* 1997. Vol. 149, no. 97, p. 319–337. DOI 10.1016/S0045-7825(97)00048-0.
 122. CALNERYTE, D. and BARAUSKAS, Rimantas. Shell Failure Simulation Using Master-Slave and Penalty Methods. In : *Information and Software Technologies. 20th International Conference, ICIST 2014, Druskininkai, Lithuania, October 9–10, 2014. Proceedings*. Springer International Publishing, 2014, p. 408–418.
 123. SCHWEIZERHOF, K, WEIMAR, K, MUNZ, Th and ROTTNER, Th. Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Models in LS-DYNA – Merits and Limits. *5th International LS-DYNA users conference*. 1998.
 124. TANIGUCHI, Norihiko, NISHIWAKI, Tsuyoshi and KAWADA, Hiroyuki. Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate. *Advanced Composite Materials*. 2007. Vol. 16, no. December 2014, p. 167–180. DOI 10.1163/156855107780918937.
 125. TOMLIN, Oliver and REYNOLDS, Neil. Validation of a Thermoplastic Composite Material Model for Low Carbon Vehicle Applications. In : *9th European LS DYNA Conference*. 2013.

AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DARBO TEMA SĄRAŠAS

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą paskelbti straipsniai:

1. Rimavicius, V., Calneryte, D., & Barauskas, R. (2013). Coupling of zones with different resolution capabilities in dynamic finite element models of woven composites. *Mechanics*, 19(3), 288–295.
2. Calneryte, D., & Barauskas, R. (2016). Multi-scale evaluation of the linear elastic and failure parameters of the unidirectional laminated textiles with application to transverse impact simulation. *Composite Structures*, 142, 325–334.

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose paskelbti straipsniai:

1. Calneryte, D., & Barauskas, R. (2015). Dynamic Analysis of 4-Node Degenerated Shell Element with Updated Thickness. In *Information and Software Technologies* (pp. 592–603). Springer International Publishing.
2. Calneryte, D., & Barauskas, R. (2015). Modelling Physical Behaviour of the Unidirectional Composite Materials with FEM Using Reduced Data. *Baltic Journal of Modern Computing*, 3(1), 16.
3. Čalnerytė, D., & Barauskas, R. (2014). Shell Failure Simulation Using Master-Slave and Penalty Methods. In *Information and Software Technologies* (pp. 408–418). Springer International Publishing.
4. Čalnerytė, D., & Barauskas, R. (2013). Two Scale Modeling of Heterogeneous Solid Body by Use of Thick Shell Finite Elements. In *Information and Software Technologies* (pp. 322–333). Springer Berlin Heidelberg.
5. Calneryte, D. (2012). Evaluation of Elasticity Parameters for Heterogeneous Material with Periodic Microstructure. In *Information and Software Technologies* (pp. 101–107). Springer Berlin Heidelberg.

SL344. 2017-05-08, 11,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 159.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

6. PRIEDAS A. G-KODO ANALIZĖ PARAMETRO β PARINKIMUI

G1 Z0.600 F7800.000
 G1 X60.084 Y104.791 F7800.000
 G1 X139.916 Y104.791 E4.17084 F4800.000
 G1 X139.916 Y104.355 E0.02275
 G1 X60.084 Y104.355 E4.17084
 G1 X60.084 Y103.920 E0.02275
 G1 X139.916 Y103.920 E4.17084
 G1 X139.916 Y103.484 E0.02275
 G1 X60.084 Y103.484 E4.17084
 G1 X60.084 Y103.049 E0.02275
 G1 X139.916 Y103.049 E4.17084
 G1 X139.916 Y102.613 E0.02275
 G1 X60.084 Y102.613 E4.17084

A1 pav. Lenkimo bandinio su sluoksnio storiu 0,3 mm ir išilgine spausdinimo kryptimi antrojo sluoksnio G-kodo fragmentas

Lentelėse naudojami simboliai:

L – gijos ilgis

d – atstumas tarp gretimų gijų centrų

E – žingsniui sunaudotas įeinančios gijos ilgis (mm). Žinoma, kad įeinančios gijos spindulys $r = 0,875$ mm.

V_G – pagal G-kodą apskaičiuotas išpiltos medžiagos tūris $V_G = \pi r^2 E$ (mm³).

V – pagal (76) formulę apskaičiuotas tūris žinomai β reikšmei (mm³).

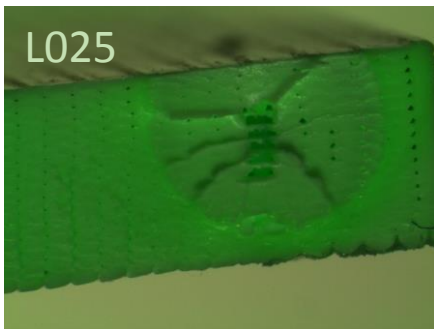
Δ apskaičiuojamas pagal formulę $\Delta = \left| \frac{V_G - V}{V_G} \right| \cdot 100$ %.

Tempimo bandiniai (spausdintuvo galvutė juda pagal ilgąją kraštinę)										
β	Sluoksnio storis, mm									
	0,2		0,25		0,3		0,35		0,4	
	L	d	L	d	L	d	L	d	L	d
	149,75	0,67	149,80	0,53	149,83	0,44	149,86	0,37	149,86	0,34
	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G
	7,82	18,82	7,83	18,82	7,83	18,83	7,83	18,83	8,33	20,03
	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$
1	18,75	0,36	17,76	5,63	16,70	11,28	15,52	17,59	16,85	15,87
1,05	19,10	1,52	18,32	2,69	17,50	7,05	16,60	11,83	17,91	10,61
1,1	19,37	2,93	18,73	0,50	18,10	3,89	17,41	7,52	18,70	6,67
1,15	19,58	4,04	19,06	1,24	18,57	1,39	18,06	4,12	19,32	3,57
1,2	19,74	4,91	19,31	2,60	18,94	0,57	18,56	1,45	19,81	1,13
1,25	19,87	5,57	19,51	3,63	19,22	2,06	18,94	0,57	20,18	0,72
1,3	19,96	6,05	19,65	4,37	19,42	3,12	19,21	2,02	20,44	2,04
1,35	20,01	6,34	19,73	4,83	19,54	3,79	19,38	2,92	20,61	2,87

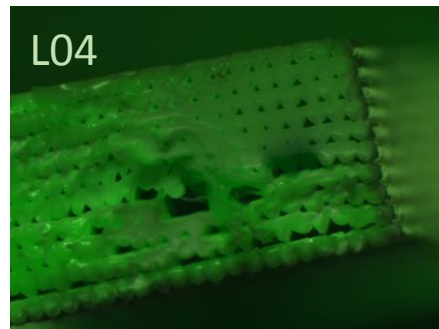
Lenkimo bandiniai (spausdintuvo galvutė juda pagal ilgąją kraštinę)										
β	Sluoksnio storis, mm									
	0,2		0,25		0,3		0,35		0,4	
	L	d	L	d	L	d	L	d	L	d
	79,75	0,67	79,80	0,53	79,83	0,44	79,86	0,37	79,87	0,34
	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G
	4,17	10,02	4,17	10,03	4,17	10,03	4,17	10,04	4,44	10,68
	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$
1	9,99	0,36	9,46	5,63	8,900	11,28	8,27	17,59	8,98	15,87
1,05	10,17	1,52	9,76	2,7	9,32	7,05	8,85	11,83	9,54	10,61
1,1	10,32	2,93	9,98	0,5	9,64	3,89	9,28	7,52	9,96	6,67
1,15	10,43	4,04	10,15	1,24	9,89	1,39	9,62	4,12	10,29	3,56
1,2	10,51	4,91	10,29	2,6	10,09	0,57	9,89	1,45	10,55	1,13
1,25	10,58	5,57	10,39	3,63	10,24	2,06	10,09	0,57	10,75	0,72
1,3	10,63	6,05	10,48	4,37	10,35	3,12	10,24	2,02	10,89	2,05
1,35	10,66	6,34	10,51	4,83	10,41	3,79	10,33	2,92	10,98	2,87

Lenkimo bandiniai (spausdintuvo galvutė juda pagal trumpąją kraštinę)										
β	Sluoksnio storis, mm									
	0,2		0,25		0,3		0,35		0,4	
	L	d	L	d	L	d	L	d	L	d
	9,75	0,63	9,8	0,5	9,83	0,42	9,86	0,36	9,87	0,33
	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G	E	V_G
	0,51	1,23	0,51	1,23	0,51	1,24	0,51	1,24	0,55	1,32
	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$	V	$\Delta, \%$
1	1,14	6,57	1,10	10,61	1,05	14,87	0,99	20,38	1,08	17,96
1,05	1,17	4,69	1,14	7,68	1,10	10,64	1,06	14,62	1,15	13,03
1,1	1,18	3,28	1,16	5,48	1,14	7,47	1,11	10,31	1,20	9,34
1,15	1,20	2,17	1,19	3,74	1,17	4,97	1,15	6,91	1,23	6,43
1,2	1,21	1,30	1,20	2,38	1,20	3,01	1,19	4,24	1,26	4,15
1,25	1,22	0,64	1,21	1,35	1,22	1,52	1,21	2,22	1,29	2,41
1,3	1,22	0,17	1,22	0,61	1,23	0,46	1,23	0,77	1,30	1,17
1,35	1,23	0,13	1,23	0,15	1,24	0,20	1,24	0,13	1,31	0,4

7. PRIEDAS B. BANDINIŲ NUOTRAUKOS

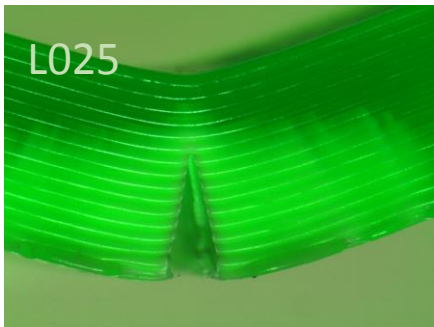


a)

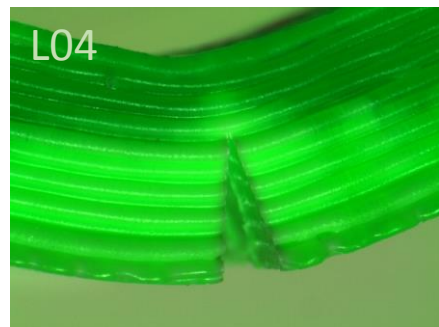


b)

B1 pav. Tempimo bandinių su sluoksnio storiais 0,25 mm (a) ir 0,4 mm (b) skerspjūviai po eksperimento

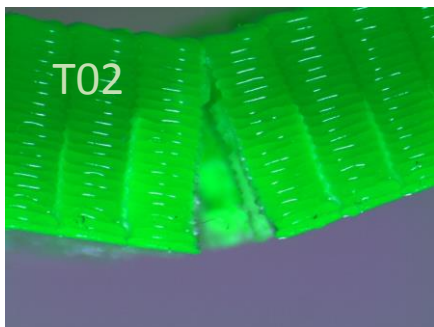


a)

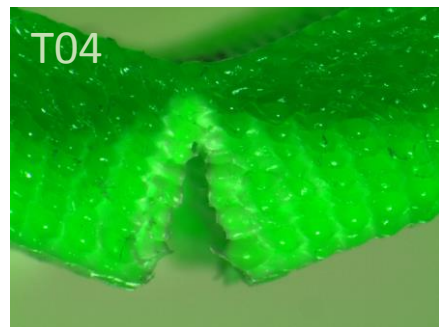


b)

B2 pav. Išilginės spausdinimo krypties bandinių su sluoksnio storiais 0,25 mm (a) ir 0,4 mm (b) skerspjūviai po eksperimento



a)



b)

B3 pav. Skersinės spausdinimo krypties bandinių su sluoksnio storiais 0,2 mm (a) ir 0,4 mm (b) skerspjūviai po eksperimento

